

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

# **Metodika sledování opotřebení keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu**

Disertační práce

Studijní program:

P2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303V002 Strojírenská technologie

Školitel:

doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.

Doktorand:

Ing. Jiří Kratochvíl

Ostrava 2010

**Anotace disertační práce:**

KRATOCHVÍL, Jiří. *Metodika sledování opotřebení keramických nástrojů pomocí odporových vrstev během řezu*. Ostrava, 2010. 118s. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava.

Školitel: doc. Ing. Vladimír VRBA, CSc.

Předkládaná disertační práce se zabývá metodikou sledování opotřebení vyměnitelných břitových destiček s nanesenou odporovou vrstvou. Odporová vrstva je nanесena na vyměnitelné břitové destičce z nitridické keramiky.

V teoretickém úvodu je práce zaměřena na rozbor keramických nástrojových materiálů. Další kapitoly pak obsahují metody zjišťování opotřebení a metody zjišťování teploty při obrábění.

Hlavní část pak již obsahuje rozbor experimentu a použité stroje a přístroje. Následuje experimentální část s popisem naměřených výsledků experimentů a rozbohem možných příčin průběhů z jejich grafického znázornění.

Závěrečná část pak obsahuje shrnutí výsledků a závěry pro vědu i praxi s následným doporučením pro další výzkum.

**Anotation of Dissertation Thesis:**

KRATOCHVÍL, Jiří. *Tool Wear Monitoring Methodic of Ceramic Cutting Tools with the use of Impedance Layers during Cutting*. Ostrava, 2010. 118s. Dissertation Thesis. VŠB-TU Ostrava.

Supervisor: Assoc. Prof. Vladimír VRBA, Ph.D., MSc

The presented dissertation thesis deal with methodology of monitoring the wear of inserts with built - up impedance layer. The Impedance layer is built - up on exchangeable cutting edge compounded of nitride ceramics.

In theoretic introduction is the work specialized on analysis of ceramic tool materials. Next chaps then include wear recognition methods plus methods of temperature recognition at cutting.

The main part then includes analysis of the experiment plus used machines and apparatus. It is followed by experimental part with description of measured results of experiments plus analysis of possible causes of courses from their graphic illustration.

The final part then includes summary of results and conclusions for science and practice with resulting recommendation for further research.

**Obsah disertační práce:**

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>8</b>
<b>2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....</b>	<b>9</b>
<b>3. ŘEZNÁ KERAMIKA .....</b>	<b>10</b>
3.1. Výroba řezné keramiky .....	11
3.1.1. Příprava práškové směsi, mletí a míchání.....	11
3.1.2. Tvarování a sušení .....	12
3.1.3. Lisování .....	13
3.2. Rozdělení řezné keramiky.....	18
3.3. Využití řezné keramiky v praxi.....	20
<b>4. OPOTŘEBENÍ NÁSTROJŮ .....</b>	<b>22</b>
4.1. Základní mechanizmy opotřebení břitu .....	22
4.2. Typy opotřebení břitu nástrojů.....	24
4.3. Kritéria opotřebení.....	30
4.4. Metody měření opotřebení.....	34
4.4.1. Přímé metody měření opotřebení.....	34
4.4.2. Nepřímé metody měření opotřebení .....	39
<b>5. MĚŘENÍ TEPLIT .....</b>	<b>43</b>
5.1. Termočlánky .....	44
5.1.1. Termočlánek přirozený .....	45
5.1.2. Poloumělý termočlánek .....	46
5.1.3. Umělý termočlánek.....	47
5.2. Termistory.....	48
5.3. Pyrometry.....	50
5.3.1. Metody určování a odstraňování vlivu emisivity.....	51
5.3.2. Závislost chyby měření na emisivitě.....	54

<b>5.4.</b>	<b>Měření pomocí termovize .....</b>	<b>55</b>
<b>5.5.</b>	<b>Změna struktury, teploměrné křídly a barvy .....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>ROZBOR EXPERIMENTU .....</b>	<b>57</b>
<b>6.1.</b>	<b>Stroj .....</b>	<b>58</b>
<b>6.2.</b>	<b>Nástroj .....</b>	<b>59</b>
6.2.1.	Vyměnitelná břitová destička od firmy Kyocera - KS 6000 .....	59
6.2.2.	Držák - XCSRNR2525M-1207SEN .....	60
<b>6.3.</b>	<b>Materiál obrobku .....</b>	<b>61</b>
6.3.1.	Materiál A - Litina 25P .....	61
6.3.2.	Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6) .....	62
<b>6.4.</b>	<b>Upnutí .....</b>	<b>63</b>
<b>6.5.</b>	<b>Měřicí zařízení použité při experimentu .....</b>	<b>64</b>
6.5.1.	Měření teploty .....	64
6.5.2.	Měření elektrického odporu .....	67
6.5.3.	Záznamové zařízení .....	68
6.5.4.	Měření opotřebení .....	70
<b>7.</b>	<b>DISKUZE A DOSAŽENÉ VÝSLEDKY .....</b>	<b>72</b>
<b>7.1.</b>	<b>Řezné podmínky .....</b>	<b>72</b>
<b>7.2.</b>	<b>Rozbor průběhu teploty <math>\theta</math> .....</b>	<b>73</b>
7.2.1.	Materiál A - Litina 25P .....	74
7.2.2.	Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6) .....	76
<b>7.3.</b>	<b>Rozbor průběhu elektrického odporu .....</b>	<b>77</b>
7.3.1.	Materiál A - Litina 25P .....	77
7.3.2.	Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6) .....	81
<b>7.4.</b>	<b>Rozbor závislosti opotřebení na elektrickém odporu .....</b>	<b>81</b>
7.4.1.	Materiál A - Litina 25P .....	81
7.4.2.	Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6) .....	86
<b>8.</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>94</b>
<b>8.1.</b>	<b>Vědecký přínos .....</b>	<b>95</b>

<b>8.2.</b>	<b>Závěry pro praxi.....</b>	<b>95</b>
<b>8.3.</b>	<b>Doporučení pro další zkoumání .....</b>	<b>96</b>

## Seznam použitého značení

A/D .....	analogově / digitální (převodník) .....	[-]
B .....	materiálová konstanta .....	[K]
CVD .....	chemické napařování z plynné fáze .....	[-]
Do .....	průměr obrobku .....	[mm]
E .....	modul pružnosti .....	[GPa]
f.....	posuv .....	[mm]
HB .....	tvrdost podle brinela .....	[-]
H <sub>E</sub> .....	intenzita vyzařování reálného tělesa .....	[W.m <sup>-2</sup> ]
H <sub>EO</sub> .....	intenzita vyzařování absolutně černého tělesa .....	[W.m <sup>-2</sup> ]
HIP .....	vysokoteplotní isostatické lisování .....	[-]
HSC .....	vysokorychlostní obrábění .....	[-]
I <sub>n</sub> .....	aktivita nástroje .....	[min <sup>-1</sup> ]
i <sub>n</sub> .....	specifická aktivita nástroje .....	[min <sup>-1</sup> ]
Itř .....	aktivita třísek .....	[min <sup>-1</sup> ]
KB .....	šířka žlábků .....	[mm]
Kf.....	vzdálenost žlábků od čela .....	[mm]
KM .....	střední vzdálenost žlábků .....	[mm]
KT.....	hloubka výmolu na čele .....	[mm]
L <sub>p</sub> .....	vzdálenost osy trysky od špičky nástroje .....	[mm]
M <sub>1</sub> .....	hmotnost destičky před otupením .....	[g]
M <sub>2</sub> .....	hmotnost destičky po otupení .....	[g]
m <sub>mat</sub> .....	hmotnost opotřebovaného materiálu .....	[g]
Mn .....	zkoumané množství nástrojového materiálu .....	[g]
NTC.....	termistory se záporným teplotním součinitelem .....	[-]
PTC.....	termistory s kladným teplotním součinitelem .....	[-]
PVD.....	nanášení odpařením z pevné fáze .....	[-]
R .....	elektrický odpor termistoru při teplotě .....	[Ω]
R <sub>0</sub> .....	elektrický odpor termistoru při výchozí teplotě .....	[Ω]
R <sub>m</sub> .....	Mez pevnosti .....	[MPa]
TiC.....	karbid titanu .....	[-]
VB .....	opotřebení na hřbetě .....	[mm]
VB <sub>B</sub> .....	opotřebení přímé části ostří (průměrné) .....	[mm]

$VB_{Bmax}$	.....opotřebení na hřbetu nástroje maximální .....	[mm]
$VB_C$	.....opotřebení hřbetu nástroje v oblasti špičky nástroje.....	[mm]
$VBD$	.....vyměnitelná břitová destička .....	[-]
$VB_N$	.....opotřebení hřbetu nástroje ve formě vrubu.....	[mm]
$VR$	.....radiální opotřebení špičky .....	[mm]
$x_m$	.....vzdálenost nástroje od obrobku .....	[mm]
$x_p$	.....vzdálenost trysky od obrobku obr. 4.15 .....	[mm]
$x_p$	.....vzdálenost trysky od obrobku.....	[mm]
$\alpha$	.....teplotní součinitel měrného elektrického odporu .....	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_n$	.....úhel hřbetu .....	[°]
$\Delta M$	.....úbytek hmoty .....	[g]
$\theta$	.....teplota .....	[°C]
$\theta_0$	.....výchozí teplota.....	[°C]
$\lambda$	.....vlnová délka .....	[μm]

## 1. ÚVOD

V mnoha podnicích je hlavní problematikou technologů snižování výrobních nákladů. Jedním z mnoha řešení této problematiky je téměř 100% využívání nástrojů a jejich řezivosti, při současném dodržení požadavků na kvalitu obrobené plochy.

V podnicích využívajících sériové linky se nevyužívá plné trvanlivosti nástroje. Raději vymění břitovou destičku dříve, než by riskovali horší než požadovanou kvalitu obrobené plochy nebo její nevratné poškození z důvodu destrukce břitu nástroje. Z těchto důvodů bývá obvykle stanovena doba trvanlivosti břitu nástroje, po které se břit nástroje mění, i když je ještě schopný řezu s požadovanou kvalitou obrobené plochy. To vede ke zvyšování vedlejších časů a k plýtvání prostředků vydávaných na nástroj.

V některých případech je, díky nehomogenitě obráběného materiálu, výskytu pískových zrníček v kůře odlitku a podobně, břit nástroje destruován ještě před stanovenou dobou trvanlivosti břitu. V těchto případech, u obráběcích strojů s obsluhou, obsluha stroje podle svých zkušeností díky procesům doprovázejícím destrukci břitu nástroje obráběcí stroj zastaví a zkontroluje břit obráběcího nástroje, případně provede výměnu. V bezobslužných systémech tuto funkci přebírají různé sondy ať už dotykové nebo bezdotykové (laserové), kdy je nástroj po dokončení řezu zkontrolován.

Pokud by bylo možné sledovat řezný proces během řezu a stanovit přesně dobu, kdy je nutné břit i v řezu vyměnit ať už z důvodů opotřebení nebo jiného poškození, zvýšila by se produktivita a snížily náklady při dodržení všech požadavků na kvalitu obrobené plochy.

Je mnoho způsobů diagnostiky řezné hrany které se snaží opotřebení řezné hrany během řezu zjišťovat, žádná z těchto diagnostických metod zatím není masově rozšířena ať už z důvodů složitosti vyhodnocování, speciálním požadavkům na použití, přílišným požadavkům na přístrojové vybavení nebo vysoké ceně.

Metoda diagnostiky řezného nástroje pomocí odporové vrstvy má potenciál pro masové rozšíření. Tato metoda diagnostiky je svou jednoduchostí a snadnou aplikovatelností pro obráběcí stroje velmi vhodná pro bezobslužné obráběcí systémy a otevírá široké možnosti využití.



## 2. Cíle disertační práce

V současné době se začíná rozšiřovat tzv. dálková diagnostika obráběcího stroje, kdy především její pomocí může servisní firma na dálku sledovat stav a využití obráběcího stroje, v případě poruchy pak může rychle reagovat a díky ukládané historii a díky možnosti zobrazení a ovládání menu CNC systému se může dopředu připravit na typ poruchy.

S využitím diagnostiky nástroje pomocí odporové vrstvy by se tato dálková metoda diagnostiky mohla rozšířit o diagnostiku nástroje a tím získávat komplexní data o stavu nástroje, procesu i samotném stroji.

Cílem disertační práce je popsání současného stavu zjišťování opotřebení obráběcích nástrojů a představení teoreticky popsané technologie diagnostiky opotřebení řezné hrany obráběcího nástroje pomocí nanesené odporové vrstvy. Experiment bude zaměřen na ověření funkčnosti sestavy (VBD s odporovou vrstvou, nožový držák s kontakty pro vedení elektrického obvodu) od firmy Saint-Gobain Advantec Ceramics, s.r.o. Czech Republic. Na jeho základě se stanoví výhody a nevýhody tohoto řešení a zhodnotí se případné využití této diagnostické metody ve strojírenské praxi.

### Dílčí cíle disertační práce jsou:

- Popsání současných diagnostických metod obráběcích nástrojů.
- Provedení experimentálního ověření funkčnosti teoretického modelu.
- Experimentálně ověřit přínosy nebo negativa diagnostiky pomocí odporové vrstvy.
- Zhodnotit přínosy této metody pro praktické využití.
- Formulovat doporučení pro výrobní proces.
- Sumarizovat doporučení pro další výzkum.
- Využití metodiky při výuce na katedře obrábění a montáže.

### 3. Řezná keramika

Název keramika byl tradičně spojován s produkty, které byly „vypalovány“ z tvarovaného přírodního materiálu. Při tvarování tohoto typu keramiky tvořily částice silikátů základní fázi uloženou ve fluidním prostředí. Velká část průmyslu, která produkuje tyto poměrně laciné produkty, bude ve využití keramiky pokračovat. Postupem času však vzrostly požadavky na použití keramiky v prostředí s podstatně vyššími nároky. Od osmdesátých let 20. století dochází k rozvoji tzv. konstrukční keramiky založené na rozvoji mikrostrukturních charakteristik, které umožní dosažení speciálních mechanických a tepelně mechanických vlastností. Požadavky na nízkou měrnou hmotnost a tepelnou vodivost, odolnost proti tepelným rázům při zachování potřebné pevnosti a tvrdosti se musely řešit vhodnou kombinací použitých materiálů a makrostruktury. [21]

Moderní definicí je keramika obecně považována jako převážně krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Tato definice zahrnuje nejen tradiční keramiku (porcelán, cihly a pod. ), ale i brousící materiály a řadu nových - speciálních, konstrukčních, strojírenských, průmyslových nebo jinak nazývaných keramických látek, jako jsou oxidická keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{BeO}$ ...), ferity, ferroelektrika, nitridy (na bázi Si, B, Al), karbidy (na bázi Si, B) a další. Pro současnou keramiku je charakteristické, že je vyráběna z poměrně čistých surovin a často z čistých výchozích chemikálií jako keramika syntetická. Jsou to látky označované jako keramika krystalická, na rozdíl od tradiční keramiky, která obsahuje i velký podíl skelné (amorfní) fáze. Keramické látky jsou vázány meziatomovými vazbami iontovými a kovalentními. Jejich vazba však není čistě iontová nebo čistě kovalentní. Zpravidla se vyskytují obě vazby zároveň. V krystalové struktuře převažují složité mřížky kubické a hexagonální. [21]

K základním vlastnostem polykrystalických keramických materiálů patří malý rozměr zrna (velmi často pod  $1\text{ }\mu\text{m}$ ), vysoká tvrdost, nízká houževnatost (důvod zvýšené křehkosti) a nízká měrná hmotnost. Zaručují dlouhou trvanlivost bříty a mohou být použity při vysokých řezných rychlostech. Při správném používání je možné dosáhnout mimořádně velký objem odebraného materiálu. [21]

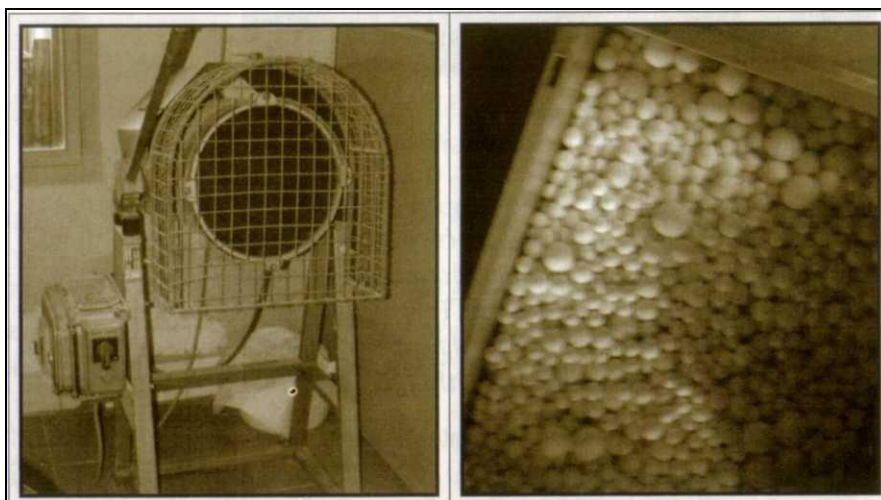
### 3.1. Výroba řezné keramiky

Obecný postup výroby keramických materiálů obr. 3.5:

- příprava práškové směsi,
- mletí,
- míchání,
- tvarování,
- sušení,
- předslinování,
- slinování,
- tepelné zpracování,
- úpravy povrchu.

#### 3.1.1. Příprava práškové směsi, mletí a míchání

Cílem operací přípravy práškových směsí je získat z různých vhodných surovin homogenní hmotu. Je důležité zvolit správný poměr a kvalitu těchto jednotlivých prášků, protože právě tyto vlastnosti prášku v konečném důsledku spoluurčují průběh slinování a tím dosažené fyzikální a mechanické vlastnosti konečného produktu. Nejprve jsou přesně navazovány základní suroviny podle daného složení a potom jsou přidány různé přísady podle požadovaného ovlivnění lisovatelnosti, základní hustoty, slinování, struktury, a pod. Výsledné prášky jsou z 90 % vícekompozitní, aby se dosáhlo co nejlepšího poměru tvrdost - houževnatost.



a)

b)

Obr. 3.1 a) mlýnice, b) korundové koule[21]

Poté se konečná směs prášků vloží do mlýnice - obr. 3.1 a), kde jsou vloženy korundové koule různých velikostí obr. 3.1 b). Mletím dojde k rozdrčení křehkých shluků zrn na požadovanou základní zrnitost. Tato směs prášků se poté tzv. homogenizuje a aktivuje povrch oxidy. Aby se částice prášku nelepily na boky mlýnice, je vnitřní vak uložen volně a levituje. To znamená, že v horní úvrati se vnitřní bok uvolní a směs spadne. Celý proces mletí trvá v řádech dnů (24 - 72 hodin). Jiným způsobem homogenizace může být přidání kapaliny ve vibračních mlýnech. Tekutá a homogenizovaná disperze se dále zpracuje v rozprašovací sušárně na lisovatelný prášek s vysokou sypkou schopností. [21]

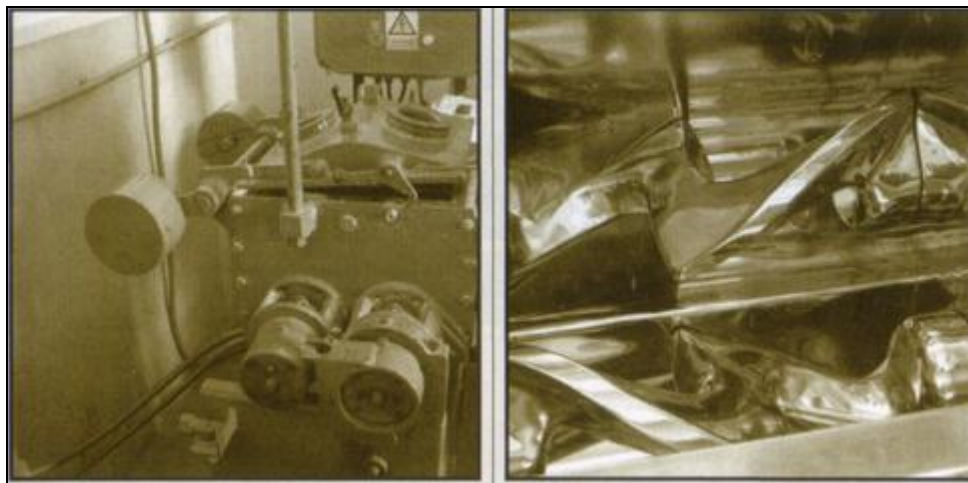
### 3.1.2. Tvarování a sušení

Ve výrobní praxi rozlišujeme dva základní způsoby tvarování vyměnitelných břitových destiček:

- vakuová extruze,
- lisování.

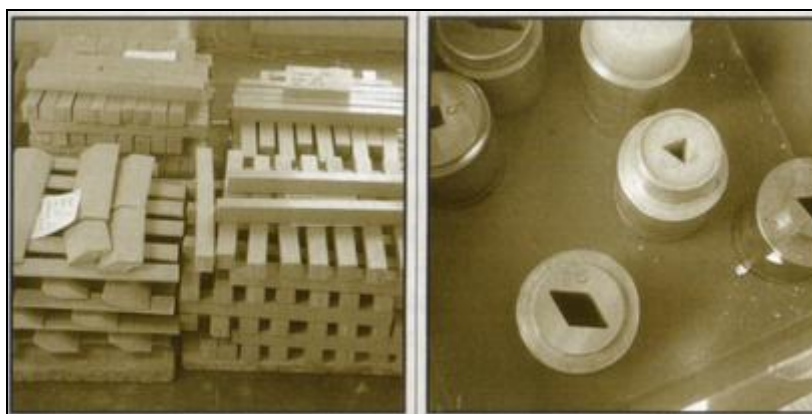
#### Vakuová extruze

Semletý prášek se nasype do hnětače - obr. 3.2 a přidají se tzv. organika. Těmi mohou být např. petrolej, kyselina olejová, a pod. Poté se pomalu hněte a pomalu se přidávají další přísady až do správné konzistence výsledné hmoty.



*Obr. 3.2 hnětač keramické směsi [21]*

Tento proces trvá až 2 dny. Následuje vytlačení (extruze) tyčí o délce přibližně 0,5 m, které mají tvar budoucí břitové destičky - obr. 3.3 a). Toho je dosaženo pomocí vytlačecích patron - obr. 3.3 b) ze slinutých karbidů, které mají tvar negativu nástroje. Hustota takto vytlačené směsi oproti teoretické je zhruba 68 % (při lisování cca 50 %).



a)

b)

*Obr. 3.3 a) extudované tyče b) vytlačovací patrony [21]*

Protože vytvarovaná směs obsahuje organická činidla, která je nutné odstranit, následuje volné sušení. Tento proces je velmi zdoluhavý a trvá až 3 měsíce. V dnešní době se začínají používat mikrovlnné sušičky, kde se doba sušení zkrátí za příznivých podmínek až na 3 dny. Po vysušení se musí tyče tzv. odsušit. Princip spočívá v pomalém ohřevu na teplotu kolem 180 °C, výdrži po dobu dvou týdnů a poté pomalém poklesu teploty. [21]

Následuje řezání tyčí na požadovanou tloušťku, včetně brousicích tolerancí, na pilách pomocí diamantových kotoučů. [21]

### **3.1.3. Lisování**

Princip lisování je podobný jako u výroby slinutých karbidů. Nevýhodou je křehkost keramických materiálů a může docházet k vyštipování hran břitových destiček. Lisování probíhá na lisech s oboustranným tlakem, aby bylo zaručeno co nejlepší zhutnění polotovaru ve všech směrech. Pro zvýšení zhutnění lze použít vibračního lisování. Další možností výroby keramických polotovarů je použití isostatického lisování. Tento způsob výroby spočívá ve vyvození lisovací síly pomocí nepropustné elastické membrány, která je poháněna hydrostatickým tlakem. Zejména pro výrobu keramiky na bázi nitridu křemíku lze použít metodu vysokoteplotního isostatického lisování HIP (Hot Isostatic Pressing). Aditiva přidávaná do této keramiky tvoří při ohřevu kapalnou fázi a to pomáhá zhutňování výsledné struktury. Nevýhodou je tvorba segregace na hranicích zrn při ochlazování a tím vytváření křehké interkrystalické struktury. Další možností je využít reaktivní slinovací proces. [21]

### **Žárové lisování (Hot Pressing)**

Rozdíl mezi slinováním a žárovým lisováním je v použití tlaku při slinovacích teplotách v peci. Lisuje se vysokými tlaky v grafitové formě při teplotách 1 200 - 2 000 °C v ochranné atmosféře při použití tlaku až 50 MPa. Díky plastické deformaci dochází ke strukturální změně, která způsobuje zbytkové pnutí v keramickém materiálu a ovlivňuje jeho tvrdost a pevnost. Žárové lisování zaručuje zhutnění a výsledkem je vyšší hustota produktu. Je hlavně používána k produkci vzorku s jemnou strukturou zrna. [21]

Mezi výhody patří. [21]:

- vysoká hustota, nízká pórovitost výlisku,
- nižší teploty a kratší časy procesu,
- minimalizace růstu krystalů,
- menší množství přísad než běžné slinování.

Nevýhody [21]:

- nákladné zařízení a vyšší cena produktu,
- nízká produktivita,
- omezený tvar výrobku.

### **Izostatické žárové lisování (Hot Isostatic Pressing = HIP)**

Metoda HIP byla původně vyvinuta pro výrobu komponentů palivových článků reaktoru a materiálů. Využívá principu všestranného působení tlakového plynu (100 - 200 MPa) na těleso ohřáté na vysokou teplotu až 2 000 °C. [21]

Jako lisovací médium se použije inertní plyn, např. argon nebo dusík. Z výchozí směsi se nejdříve pístovým nebo izostatickým způsobem vylisují tělesa požadovaného tvaru, ta se případně vypálí a potom uzavřou do pouzdra nepropustného pro lisovací plyn. Zapouzdřené výlisky se uloží do tlakové nádoby s inertním plynem a vypalují na požadovanou teplotu. Zahřátý plyn vyvíjí na výlisky potřebný všesměrný lisovací tlak, takže dosahují objemové hmotnosti blízké jejich hustotě při malé změně rozdělení velikosti zrn proti původnímu stavu. [21]

HIP poskytuje materiály s řízenou mikrostrukturou, tedy i s velmi vysokými mechanickými pevnostmi. Výlisky je třeba po vylisování opracovat nejčastěji broušením a následným leštěním.

Hlavní výhody metody HIP [21]:

- rovnoměrná hustota blízká teoretické hodnotě a nízká pórovitost,
- možnost lisování nepravidelných tvarů,
- jemnozrnné struktury,
- úspora materiálu,
- zvýšení odolnosti proti únavě a houževnatosti.

### **Reaktivní slinovací proces (Reaction Bonded Process)**

Je vhodný pro výrobu nitridační keramiky při teplotách 1 200 - 1 600 °C. Nejprve je třeba smíchané prášky zahřát na nižší teplotu a za nízkého tlaku v dusíkaté atmosféře dosáhnout potřebné pórovitosti. Po dosažení potřebné pórovitosti se rapidně zvýší tlak a teplota dusíkatého plynu do doby, než je dokončeno slinování. [21]

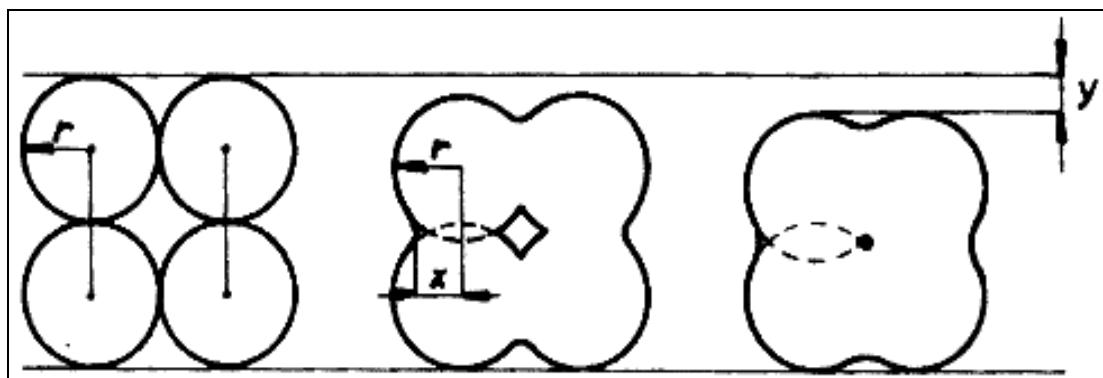
Výrobek je pórovitý s hustotou menší než 85 % teoretické hustoty. V důsledku této nízké hustoty má výrobek i další nepříznivé vlastnosti. Protože se jedná o vysoce čistý materiál, který neobsahuje cizí fáze na hranicích zrn, je jeho pevnost i při tak nízké hustotě poměrně vysoká. Mezi výhody této metody patří neomezený tvar výrobku a malé změny rozměrů při následujícím slinování, takže lze vyrobit součásti s velmi úzkými rozměrovými tolerancemi. [21]

### **Předslinování a slinování**

Slinováním se rozumí zhutňovací postup navzájem se dotýkajících částic krystalů, které vlivem tepla slinou (krystaly polotovarů) srůstají. Teploty slinování se dosáhne asi při 80 % teploty tavení slinovaného materiálu. V případě řezné keramiky na bázi oxidu hlinitého je to kolem 1 550 °C po dobu 10 hodin. Celý proces trvá jeden den a dosáhne se zhutnění na 99 % teoretické hustoty výsledného produktu. Teprve po tomto procesu dosáhnou keramické materiály pevnostních vlastností nutných pro řezné nástroje. Na obr. 3.4 je na modelu znázorněn průběh slinování se smrštěním a tvorbou pórů. Hodnoty lineárního smrštění mohou dosahovat až 20 %, což při přepočítání na smrštění objemu dělá až 50 %. [21]

Hnací silou pro slinovací proces je energie přicházející z povrchu výchozího prášku, která se uvolňuje při vysokých teplotách. [21]

- zmenšením měrného povrchu tvorbou nového nebo růstem krystalu,
- zmenšením prostoru pórů a povrchu pórů,
- odbouráním nerovnovážného stavu v mřížce krystalu.



Obr. 3.4 Slinovací proces .[21]

Aby byl slinovací proces co možná nejkvalitnější, je ho nutné přesně řídit a po celou dobu kontrolovat. To se netýká jen doby a teploty slinování, ale i např. ochranné atmosféry. Jen tak se dají vyrobit materiály velmi hutné, ne-porézní s jemným zrněním. [21]

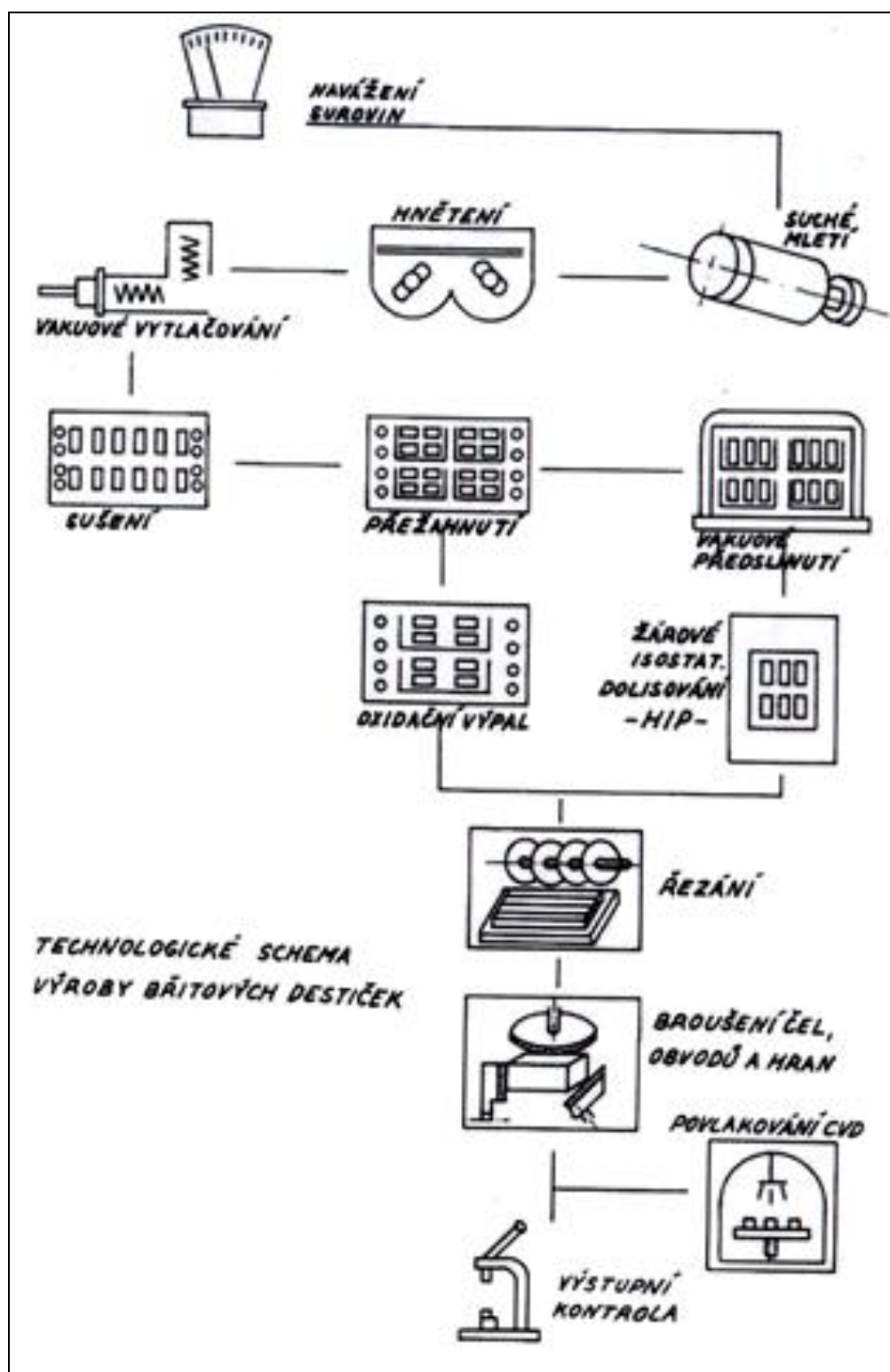
### Úprava povrchu

Jako poslední fáze vstupuje do výroby keramických břitových destiček úprava povrchu. Rozumí se tím broušení slinutých nebo žárově lisovaných destiček. Vzhledem k poměrně vysoké tvrdosti keramických materiálů je nutné použít diamantového brusiva. [21]

Používají se k tomu planetové brusky, na kterých jsou ve speciálních miskách připevněny jednotlivé břitové destičky a brousí se za intenzivního chlazení pomocí volného diamantového prášku nejprve jedna strana a poté strana opačná.[21]

Zvýšená pozornost se musí věnovat dosedacím plochám, jejich rovinnosti a kvalitě ostří. Na ostří se brousí zpevňující ochranná fazetka pomocí CNC brusek. Pro dosažení vhodného tvaru třísky mohou být předlisovány nebo vybroušeny jednoduché lamače. Na závěr je důležité břitové destičky důkladně odmastit v technickém benzínu a podrobit výstupní kontrole. [21]





Obr. 3.5 Technologické schéma výroby VBD z řezné keramiky .[21]

### Povlakování řezné keramiky

Povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinutých karbidů. Používá se téměř výhradně metoda CVD (Chemical Vapour Deposition). V poslední době se začíná díky firmě CemeCon používat i metoda PVD (Physical Vapour Deposition). Hlavním posláním povlaku je zvýšení houževnatosti pomocí snížení šíření mikrotrhlinek základního materiálu nebo zvýšení otěruvzdornosti řezných hran. Nanáší se jedna vrstva karbidů nebo nitridů kovů (např. TiN, TiCN, a pod.), popř. povlak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  na základní materiál  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . [21]

## 3.2. Rozdělení řezné keramiky

Keramické materiály, využívané pro výrobu vyměnitelných břitových destiček řezných nástrojů, jsou obvykle rozdělovány následovně:

- **oxidická keramika:** - čistá (čistý  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),
  - **polosměsná** ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{CoO}$ ),
  - **směsná** ( $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ZrO}_2+\text{TiC}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiC}+\text{TiN}$ ),
- **nitridová** ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4+\text{TiN}$ , sialony),
- **vyztužená** (oxidická nebo nitridová keramika vyztužená pomocí whiskerů SiC nebo  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

Keramika na bázi **čistého oxidu hlinitého** má relativně nízkou pevnost a houževnatost a také malou tepelnou vodivost. Tyto zajisté ne zrovna nejlepší vlastnosti pro obrábění kovů jsou příčinou vylamování břitů při nepříznivých podmínkách obrábění. [1]

Přidáním malého množství oxidu zirkoničitého bylo možné uvedené vlastnosti čisté keramiky podstatně zlepšit. Výhody druhů, obsahujících zirkon, spočívají v jejich zlepšené houževnatosti. Tvrdost, hustota a stejnoměrná velikost zrna určují společně s množstvím přidávaného zirkonu rozsah použití. Jakákoliv porezita snižuje výkon nástroje. Barva čisté keramiky lisované za studena je bílá, u keramiky lisované za tepla je šedá. [1]

**Směsná keramika** na bázi oxidu hlinitého získává přidáním kovové fáze vyšší odolnost proti tepelnému šoku. Tento typ řezného materiálu je pro svoji zlepšenou tepelnou vodivost podstatně méně náchylný k lomu, ale také tato zlepšení jsou relativní a houževnatost těchto materiálů není v žádném případě možné porovnávat se slinutými karbidy. [1]

Kovová fáze sestává z karbidu titaničitého a nitridu titanu v množství od 20 do 40 %. Obvyklá jsou také jiná aditiva. Při výrobě lisováním zatepla vznikají vyměnitelné břitové destičky černé barvy, jejichž oblast použití zahrnuje již všechny operace a materiály, které lze obrábět keramikou.[1]

**Vyztužená keramika** na bázi oxidu hlinitého je relativně novým výsledkem vývoje. Nazývá se také keramika zesílená whiskerem — název je odvozen od vláken krystalu, kterému se říká whisker. Tyto whiskery mají průměr pouze cca 1  $\mu\text{m}$  a délku více než 20  $\mu\text{m}$ . Sestávají se z karbidu křemíku a mají velmi vysokou pevnost. [1]

Účinky tohoto vyztužení jsou mimořádné. Podstatně se zvýší houževnatost, pevnost v tahu, odolnost proti tepelnému šoku a současně také tvrdost zatepla a odolnost proti opotřebení. Jedná se o zcela nový řezný materiál, jehož vlastnosti se vymykají z dosud uváděných poznatků. Tento materiál je možné s ohledem na jeho vysokou mez pevnosti používat optimálně. Podíl whiskeru v řezném materiálu činí cca 30 %. [1]

Lisováním zatepla se dosáhne v břitové destičce stejnoměrného rozptýlení whiskeru. Barva hotových destiček je zelená. Vyvážená tvrdost, houževnatost a odolnost proti tepelnému šoku charakterizují tento druh keramiky při obrábění žáruvzdorných slitin, kalené oceli, šedé litiny a zejména při obrábění přerušovaným řezem. [1]

**Neoxidická keramika na bázi nitridu křemíku** je naprosto rozdílný řezný materiál. Zvláště chování při tepelném šoku a houževnatost jsou lepší než u keramiky na bázi oxidu hlinitého. Při obrábění šedé litiny s velkým objemem odebíraného materiálu nemá tento řezný materiál konkurenci. I když je obrábění šedé litiny relativně jednoduché, přesto klade při velkém objemu odebíraného materiálu a vysokých řezných rychlostech velmi vysoké požadavky na řezný materiál, kterými jsou: vysoká tvrdost zatepla, pevnost, houževnatost, odolnost proti tepelnému šoku a chemická stabilita. [1]

Keramika na bázi nitridu křemíku si zachovává vysoký stupeň tvrdosti zatepla při teplotách, které slinutý karbid už nesnáší. Mimo to je houževnatější než keramika na bázi oxidu hlinitého. I když tento řezný materiál nemá takovou chemickou stabilitu při obrábění oceli jako keramika na bázi oxidu hlinitého, lze jej úspěšně použít k obrábění šedé litiny zasucha i při chlazení řeznými rychlostmi až přes 400  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . [1]

Keramika z nitridu křemíku je dvoufázový materiál, v němž jsou krystaly nitridu křemičitého uloženy v pojivu, jeho vlastnosti jsou určovány složením. Výroba destiček se provádí lisováním zastudena a slinováním nebo výhodnější metodou lisováním zatepla s

vybrušováním tvarů. I tento materiál je relativně novým řezným materiálem, který byl vyvinut kolem roku 1970. Jeho používání se rozšířilo i do oblasti konstrukčních materiálů, například na výrobu vysokovýkonných konstrukčních dílů pro motory.

Porovnáme-li houževnatost, tvrdost, odolnost proti tepelnému šoku a chemickou stabilitu u obou druhů zmíněné řezné keramiky při obrábění materiálů na bázi železa a niklu, je keramika na bázi nitridu křemíku zvláště vhodná pro obrábění šedé litiny. [1]

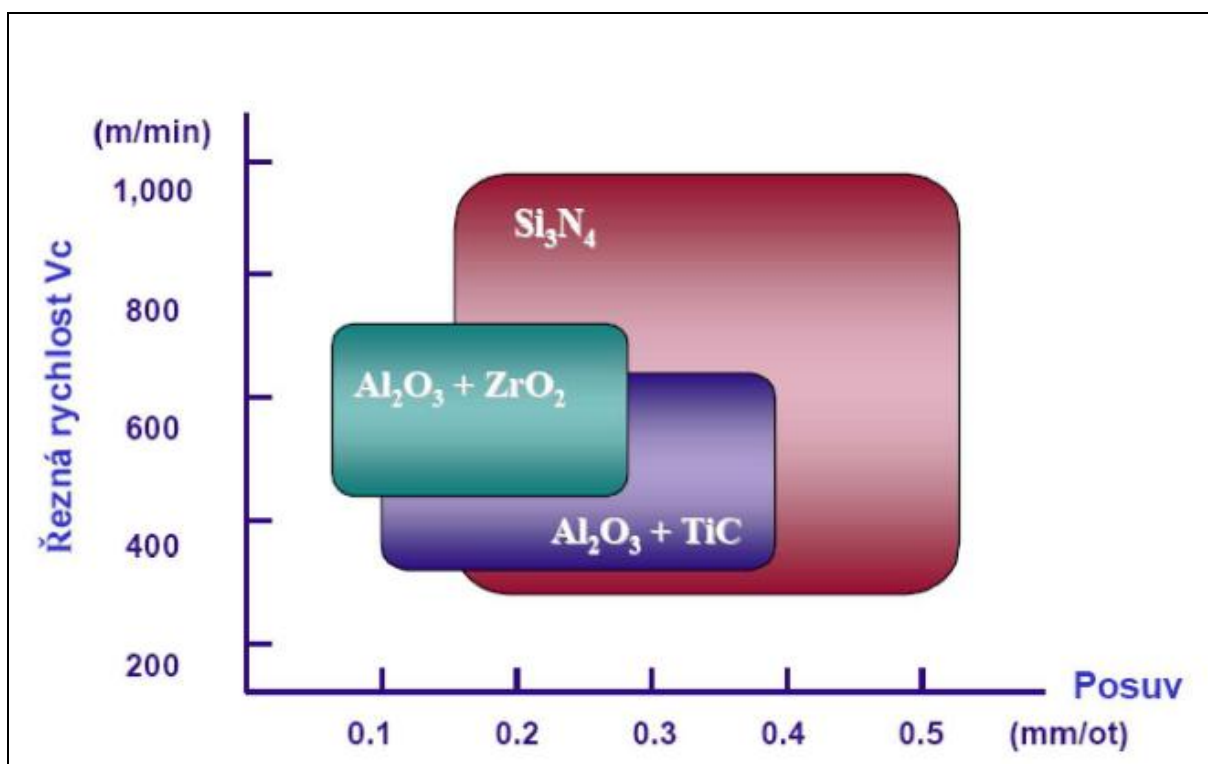
### 3.3. Využití řezné keramiky v praxi

Řezná keramika patří do skupiny netradičních řezných materiálů, její použití v obrábění představuje 4-5% z celkového objemu řezných materiálů. Existují ale specifické oblasti, kde řezná keramika představuje daleko vyšší procento, jedná se o letecký, kosmický a automobilový průmysl. Zde keramika přispěla k celkové intenzifikaci řezného procesu, protože díky svým vlastnostem umožňuje dosahovat i řezných rychlostí vyšších než 1000 m.min<sup>-1</sup>. Rozsah použití základních druhů řezných keramik viz.obr. 3.6. V tab. 3.1 lze nalézt základní možnosti využití nástrojů z řezné keramiky.

Tab. 3.1 Oblasti využití nástrojů z řezné keramiky [35]

Druh řezné keramiky	Charakteristické použití řezné keramiky	Charakter řezu
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Obrábění šedé litiny a konstrukčních ocelí nepřerušovaným řezem vysokými rychlostmi za sucha.	Dokončovací operace.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + ZrO<sub>2</sub></b>	Obrábění šedé, tvárné a kujné litiny vytvrzené na 300HB. Obrábění uhlíkové, legované a nástrojové oceli vytvrzené na 38 HRC za sucha.	Střední a dokončovací operace, částečně přerušovaný řez.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + TiC</b>	Obrábění kalených ocelí a těžko obrobitelných materiálů s částečně přerušovaným řezem za sucha i s chlazením, obrábění šedé litiny a tvrzených litin.	Střední a dokončovací operace včetně frézování.
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiC (whiskery)</b>	Obrábění žáruvzdorných slitin a žáropevných materiálu a kalené oceli.	Hrubovací a dokončovací operace.
<b>Sialony</b>	Hrubé obrábění superslitin na bázi niklu pro letecké motory a pro použití v agresivním prostředí. Řezy vyžadující vysoký posuv, rychlost nebo hloubku. Litina při vysokých rychlostech.	Hrubovací a dokončovací operace.
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	Hrubé soustružení a frézování všech druhů litiny v těžkých podmínkách. Soustružení žáruvzdorných slitin na bázi niklu za sucha i s chlazením.	Hrubovací a dokončovací operace.

Řezná keramika má také uplatnění v HSC obrábění a to proto, že má vysokou tvrdost za tepla a chemicky nereaguje s materiálem. Zaručuje dlouhou trvanlivost bříty a může být použita při vysokých řezných rychlostech. Při správných řezných podmínkách je možné dosáhnout velkého objemu odebíraného materiálu. K hlavním druhům materiálů, které se obrábějí keramikou, patří těžkoobrobitelné materiály, kalené oceli, tvrzené litiny a povrchově kalené obrobky. [34]



Obr. 3.6 Rozsah použití druhů řezných keramik[35]

## 4. Opotřebení nástrojů

Všechny břity řezných nástrojů podléhají při obrábění určitému opotřebení, kterému jsou vystaveny až do okamžiku dosažení konce doby trvanlivosti.

Při obrábění načisto je břit VBD považován za opotřeбенý, není-li schopen dosahovat požadované kvality opracování povrchu. Při hrubovacích operacích se tolerují podstatně větší hodnoty opotřebení.

Pro dosažení nejvyšší možné produktivity obrábění je rozhodující volba správného řezného nástroje. Volba materiálu a geometrie břitu hrají přitom zvláštní roli. Přesto se však může stát, že i při správné volbě nástroje nelze docílit uspokojivé doby trvanlivosti. Vibrace vznikající v průběhu obrábění, vyvolané například nedostatečnou tuhostí držáku nástroje nebo chybným upnutím obrobku, způsobují vždy předčasné ukončení trvanlivosti břitu.[1]

### 4.1. Základní mechanizmy opotřebení břitu

Opotřebení břitu obráběcího nástroje způsobuje vždy několik zatěžujících faktorů ať už fyzikálních nebo chemických. Tyto faktory mění geometrii břitu což ovlivňuje parametry obrobené plochy. Mezi hlavní činitele ovlivňující opotřebení patří fyzikální a mechanické vlastnosti obráběného a nástrojového materiálu, geometrie nástroje, pracovní podmínky, řezné prostředí, druh obráběcí operace, atd. Opotřebení je tedy interakcí mezi nástrojem a obrobkem při svém vzájemném kontaktu a relativním pohybu nástroj-tříska, nástroj-obrobek.

Rozlišujeme několik základních mechanismů opotřebení:

- abrazivní opotřebení,
- adhézní opotřebení,
- difúzní opotřebení,
- oxidační opotřebení,
- lom.

**Abrazivní opotřebení** je velmi rozšířenou formou opotřebení, která vzniká hlavně (ale ne výlučně) působením tvrdých částic v materiálu obrobku. Je to podobné jako při broušení, při němž se mezi povrch obrobku a povrch nástroje dostávají tvrdé částice. Vlivem

mechanického zatížení tak vzniká rovinná plocha na hřbetě bříty. Schopnost bříty odolávat abrazivnímu opotřebení je z větší části závislá na jeho tvrdosti. Řezný nástrojový materiál, který obsahuje hustou strukturu tvrdých částic, bude tomuto opotřebení odolávat dobře, ale nemusí odolávat dobře také jiným druhům opotřebení [1].

**Adhézní opotřebení** se vyskytuje hlavně při nízkých teplotách obrábění na čele bříty nástroje. Tento jev vede k vytváření nárůstku mezi břitem a třískou. Jedná se přitom o dynamický průběh s narůstajícím počtem vrstev, které jsou z třísky navařovány a vytvrzovány a stávají se tak součástí bříty. Takto nárůstkem vytvořený břit může vytvořit základ pro nové nárůstky na bříty nebo poškodit původní břit vydrolováním, nebo výlomem. Tendence vytváření nárůstkových břitů se mění s druhem nástrojového materiálu. Jakmile se zvýší teploty řezání, zmenšují se i předpoklady pro vznik tohoto jevu. Při obrábění materiálů náchylných ke zpevňování zastudena vede tento druh opotřebení k typickým poškozením, vyvolaným vytvrzeným povrchem obrobku [1].

**Difúzní opotřebení** vzniká působením chemických jevů při procesu obrábění. Afinita chemických vlastností nástroje a obrobku je rozhodující pro vznik a průběh difúzního opotřebení. Afinita mezi slinutým karbidem a ocelí vede k pokračujícímu difúznímu opotřebení. Důsledkem je vznik žlábků na čele bříty břitové destičky. Protože toto opotřebení souvisí s teplotou, vytvoří se při vysokých řezných rychlostech větší žlábek. Opatření proti tomuto opotřebení je například použití TiC a TaC (gama-fáze) ve slinutém karbidu, čímž je možno vyrobit SK, kterými lze obrábět ocel bez problémů [1].

**Oxidační opotřebení** vysoké teploty a okolní vzduch mají za následek oxidaci většiny kovů, i když takovéto oxidy působí velmi rozdílně. W a Co tvoří porézní filmy oxidu, které jsou snadno odnášeny třískou. Jiné oxidy, jako například oxid hlinitý, jsou naproti tomu podstatně pevnější a tvrdší. Některé řezné nástrojové materiály jsou proto náchylnější k oxidačnímu opotřebení než jiné. Speciálně v místě kontaktu bříty, kde končí šířka třísky (dle hloubky řezu) má vzduch přístup do řezného procesu. V tomto případě vznikají působením oxidace typické žlábků, které však jsou v současné výrobě relativně vzácným fenoménem [1].

**Únavový lom** má často termomechanické příčiny. Kolísání teploty a zatížení řeznými silami mohou vést k vydrolování a lomu řezného nástroje. Čistá mechanická únava může být vyvolána s ohledem na mechanickou pevnost bříty příliš vysokými řeznými silami. Příčiny mohou být na jedné straně v příliš velké tvrdosti nebo pevnosti materiálu obrobku nebo na druhé straně v příliš tvrdém řezném nástrojovém materiálu. Ale také v případě velmi měkkého řezného nástrojového materiálu může dojít k lomu, dojde – li vlivem vysokých teplot k plastické deformaci bříty a tím ke změně jeho geometrie. Důsledek: zvýšené řezné síly a následný lom [1].

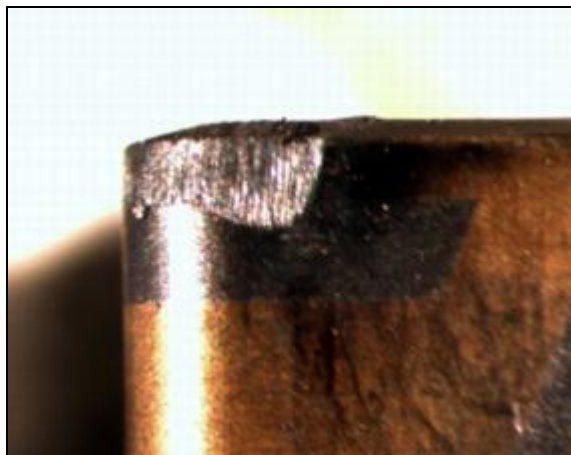
## 4.2. Typy opotřebení bříty nástrojů

Typy opotřebení bříty nástrojů mohou být:

- opotřebení hřbetu bříty,
- opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty,
- plastická deformace bříty,
- opotřebení ve tvaru vrubu na hřbetě bříty,
- hřebenovité trhliny na ostří,
- únavový lom,
- vydrolování ostří,
- lom bříty nástroje,
- tvoření nárůstku.

**Opotřebení hřbetu bříty.** (obr. 4.1) patří mezi abrazivní formy opotřebení a projevuje se na hřbetní ploše bříty. Plochy hřbetu u hlavního ostří, vedlejšího ostří, poloměru špičky, nebo na čelní fasetce jsou před utvářením třísky v průběhu a po utváření třísky zvlášť vystaveny působení materiálu obrobku. Opotřebení hřbetu bříty je všeobecně obvyklým typem opotřebení, přičemž stejnoměrně se zvětšující opotřebení hřbetu bříty je často považováno za ideální. Příliš velké opotřebení hřbetu bříty má za následek zhoršení jakosti obrobeného povrchu, nepřesnost rozměrů a narůstající tření, které vzniká změnou geometrie bříty. [1]

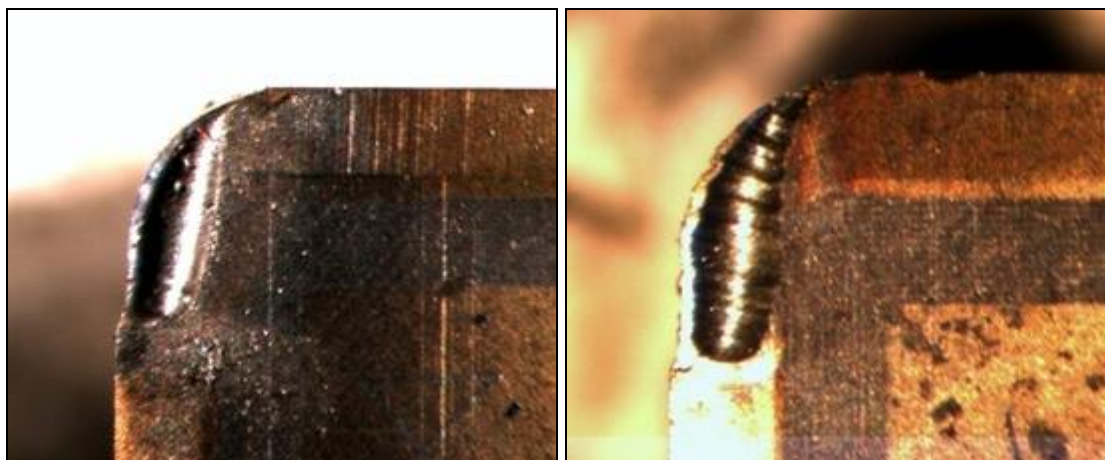




*Obr. 4.1 Ukázka opotřebení hřbetu bříty z experimentu*

**Opotřebení ve tvaru žlábků na čele bříty** (obr. 4.2) je důsledkem působení mechanismů difúzního opotřebení a abraze. Žlábek vzniká částečně úběrem rezného nástrojového materiálu, vyvolaným brousícím pochodem, který způsobují tvrdé částice obsažené v materiálu obrobku, ale hlavně difúzí v místě bříty s nejvyšší teplotou, to znamená v kontaktním místě mezi třískou a materiálem bříty. Tvrdost zatepla a malá afinita mezi materiály obrobku a bříty nástroje snižují tendenci ke vzniku tohoto typu opotřebení. Mimořádně velké opotřebení v podobě žlábků může změnit geometrii bříty a ovlivnit tak tvar třísky, změnit směr působení rezných sil a zeslabit břit. [1]

Na obr. 4.2 vpravo lze jasně pozorovat charakteristické stopy způsobené tvrdými částicemi v ocelové třísce.



*Obr. 4.2 Ukázka opotřebení čela bříty z experimentu vlevo při obrábění litiny vpravo oceli*

**Plastická deformace břitu** (obr. 4.3) vzniká působením kombinace vysokých teplot a řezných tlaků na břitu. Vysoké řezné rychlosti a posuvy, jakož i tvrdé materiály obrobků vyvolávají vznik vysokých teplot a tlaků. U řezného nástrojového materiálu, který těmto zatížením odolává a plasticky se nedeformuje, je tvrdost zatepla rozhodujícím faktorem. Typická deformace (vyboulení) břitu ještě více zvyšuje teploty a má za následek změnu geometrie břitu, změny v odchodu třísek a může velmi rychle dosáhnout kritického stádia. Toto opotřebení lze zmenšit použitím správného zaoblení ostří a volbou správné geometrie břitu.[1]

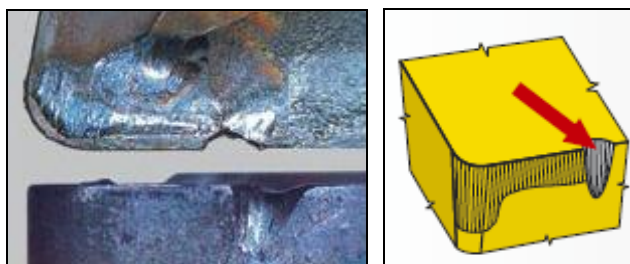
U materiálu použitého při experimentu tento typ opotřebení nenastává. Řezná keramika má vysokou tvrdost a také bohužel i křehkost, tudíž ve většině případů místo tohoto typu opotřebení nastává lom.



Obr. 4.3 Ukázka plastické deformace břitu [20]

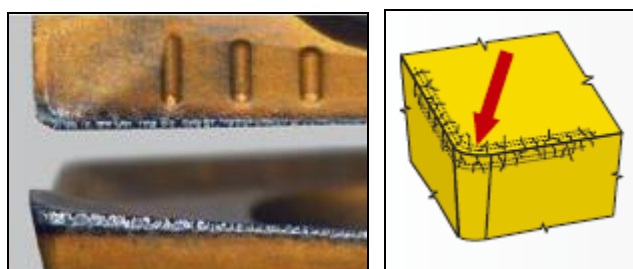
**Opotřebení ve tvaru vrubu na hlavním hřbetě břitu** (obr. 4.4) patří k typickým adhezním opotřebením, může však stejně dobře souviset s jevem oxidačního opotřebení. Vruby vznikají v místě kontaktu břitu s bokem třísky. Toto opotřebení se omezuje přesně na to místo, kudy proniká vzduch do oblasti obrábění. **Opotřebení ve tvaru vrubu na vedlejším hřbetě břitu** má mechanické příčiny; jejich původci jsou tvrdé částice materiálu obrobku. Mimořádně velké opotřebení ve tvaru vrubu ovlivňuje utváření třísky a může vést k lomu destičky. [1]

Při experimentu toto opotřebení nenastalo, protože keramika není náchylná na tento druh opotřebení.



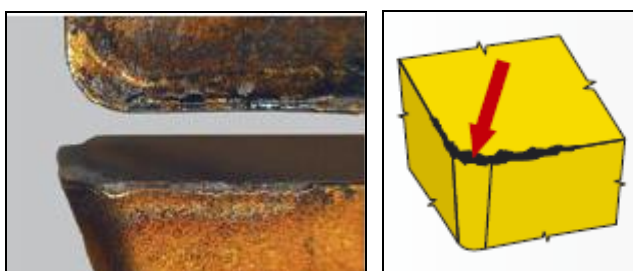
Obr. 4.4 Ukázka opotřebení na hlavním hřbetě břitu [20]

**Vznik hřebenových trhlin na ostří** (obr. 4.5) je formou únavového opotřebení, které vzniká tepelnými šoky. Zvláště změna teplot při frézování často vede k tomuto druhu opotřebení. Trhliny se tvoří kolmo na ostří, přitom se mohou částice řezného nástrojového materiálu mezi jednotlivými trhlinami vylamovat a vyvolat tak náhlý lom břitu. Změnou tloušťky třísky se při obrábění změní rovněž teploty. Použití procesní kapaliny se však nedoporučuje, protože zvyšuje teplotní rozdíly při záběru břitu do materiálu obrobku a při výstupu z něj. [1]



Obr. 4.5 Ukázka hřebenových trhlin na ostří [20]

**Vydrolování ostří** (obr. 4.6) je formou opotřebení, při níž se břit namísto stejnoměrného opotřebovávání vydroluje. Toto opotřebení je způsobeno špičkami zatížení a vede k tomu, že drobné částice řezného nástrojového materiálu se začnou oddělovat z povrchu břitu. Přerušované řezy jsou nejčastější příčinou tohoto typu opotřebení. Pečlivé sledování břitu ukáže, kde je možné očekávat vydrolování. Odlupování materiálu a trhliny jsou příznaky, které upozorňují na možnost lomu břitu. [1].

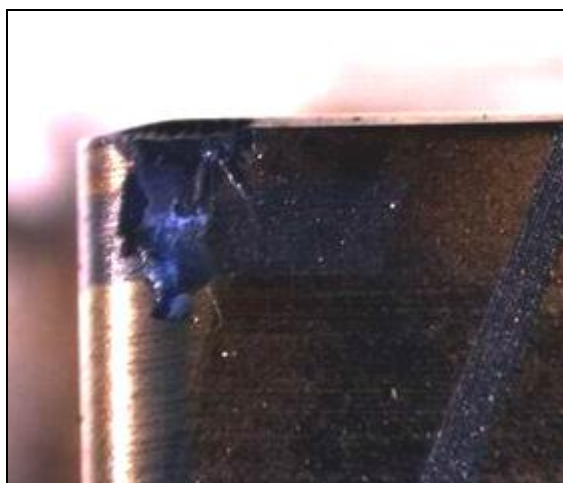


Obr. 4.6 Ukázka vydrolování ostří [20]

**Únavový lom** je typickým následkem mimořádně velkých změn velikosti řezných sil. Tento druh lomu vzniká vlivem součtu neustále se měnících různých zatížení, kdy působení

jednotlivých druhů zatížení není samo o sobě dost velké, aby mělo za následek lom. Způsob vřezávání nástroje do materiálu obrobku a změna velikosti a směru působení řezné síly mohou být pro pevnost a houževnatost vyměnitelné břitové destičky příliš náročné. Lomové plochy probíhají paralelně s ostřím.[1].

**Lom břitu nástroje** (obr. 4.7) je osudným koncem každého břitu. Totální lom je často velmi nebezpečný a mělo by se mu za všech okolností zabránit. Lom břitu nástroje je nutné v každém případě považovat za ukončení trvanlivosti. Změny geometrie, oslabení břitu, nárůst teplot a sil mohou vést ke značným škodám. Křehký lom může být způsoben různými faktory; často je zvolený materiál břitu málo houževnatý, aby mohl zvládnout všechny požadavky na obrábění.[1]



*Obr. 4.7 Ukázka lomu nástroje*

**Tvorba nárůstku** (obr. 4.8) je v převážné většině případů fenoménem, vztahujícím se k teplotám a řezným rychlostem. Může však být způsobena i odlupováním vrstev v místě břitu, nebo jinými formami opotřebení.



*Obr. 4.8 Ukázka nárůstku [20]*

Mimo změny geometrie břitu působí tato forma opotřebení negativně ještě proto, že se mohou částice materiálu břitu odlomit společně s navařeným nárůstkem, který je tvořen částicemi materiálu obrobku. Afinita materiálu břitu k materiálu obrobku hraje v tomto případě rozhodující roli. Nízké teploty a vysoké tlaky přitom vyvolávají mezi materiálem třísky a čelem nástroje efekt svařování. Naštěstí jsou oblasti teplot a řezných rychlostí, při nichž nárůstky vznikají, relativně dobře známé, proto je možné tomuto jevu často zabránit. Velká část moderních způsobů obrábění probíhá stejně nad oblastí tvorby nárůstku a mnohé moderní řezné materiály nemají při správném použití k této formě opotřebení sklony. Zhoršená jakost obrobeného povrchu je často prvním negativním důsledkem pokračující tvorby nárůstku; nadměrná tvorba nárůstku může v nejhorším případě vést dokonce i k lomu břitové destičky.[1]

### 4.3. Kritéria opotřebení

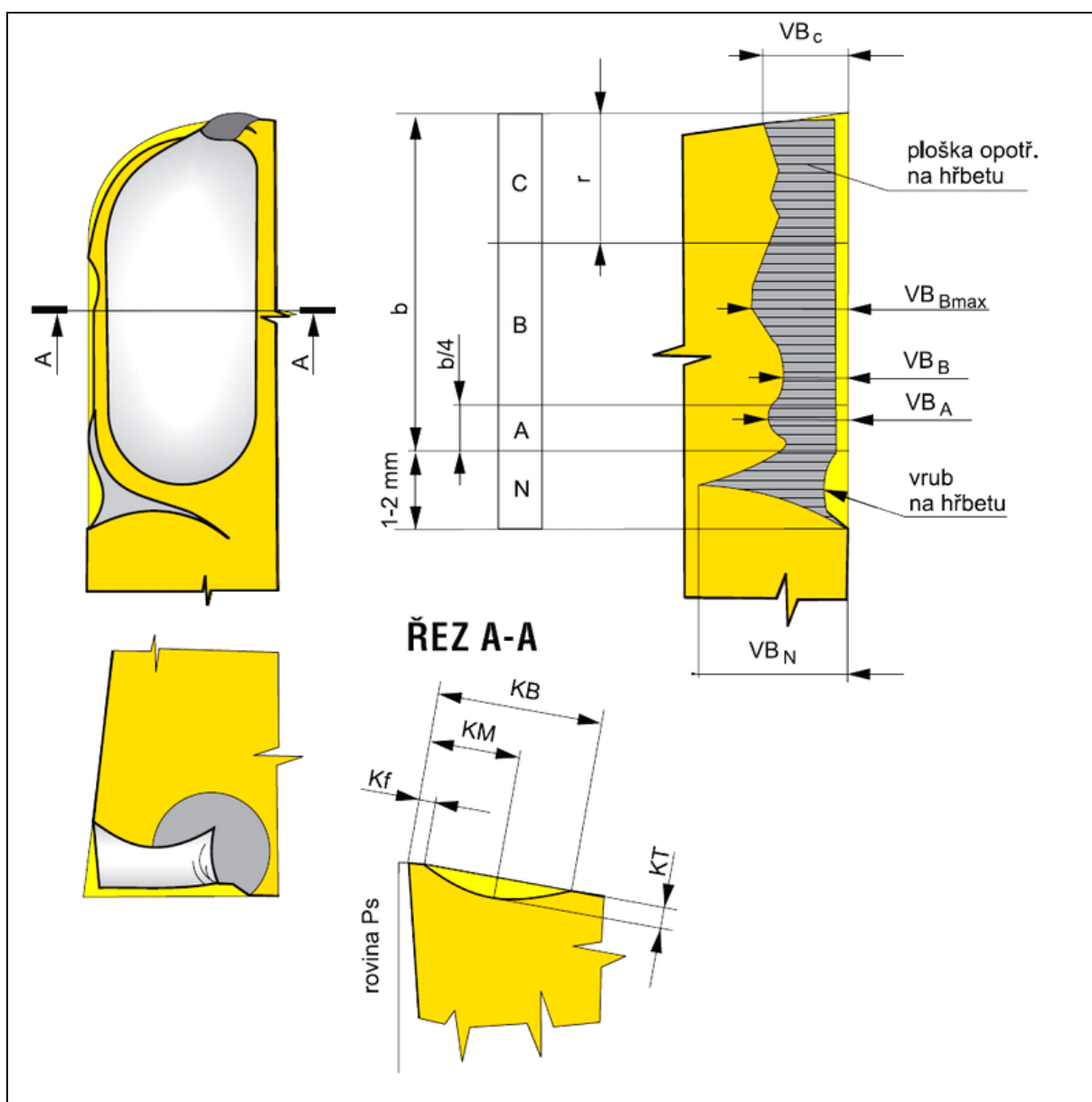
Kritéria, kterými je opotřebení kvantifikováno, jsou uvedena na obr. 4.9 podle normy ISO 3685. Nejčastěji užívaná kritéria:

**VB** - opotřebení na hřbetě,

**KT** - hloubka výmolů na čele,

**VR** - radiální opotřebení špičky.

Tyto kritéria mají největší vliv na výsledek obrábění. Opotřebení na hřbetě VB přímo ovlivňuje obrobený povrch součásti, opotřebení KT zásadně snižuje pevnost nástroje a opotřebení VR ovlivňuje rozměry obráběné součásti.



Obr. 4.9 Kritéria opotřebení rezného nástroje dle ISO 3685 [19]

$VB$  – opotřebení na hřbetě,

$VB_C$  – opotřebení v oblasti špičky nástroje,

$VB_N$  – opotřebení ve formě vrubu,

$VB_B$  – opotřebení přímé části ostří (průměrné),

$VB_{Bmax}$  – opotřebení maximální,

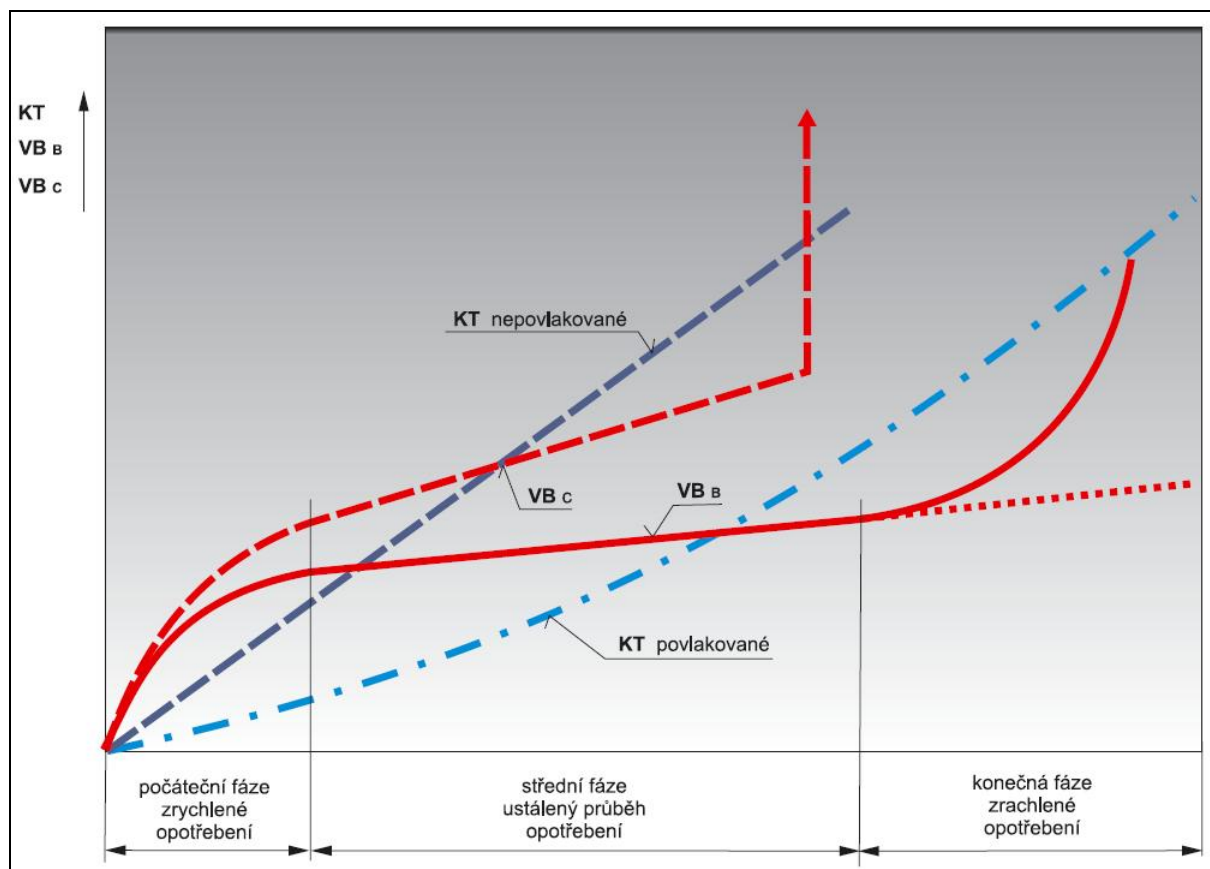
$KT$  – hloubka výmolu na čele,

$K_f$  – vzdálenost výmolu od čela,

$K_M$  – střední vzdálenost výmolu,

$K_B$  – šířka výmolu.

Průběh teoretické závislosti nejčastějších opotřebení na čase je znázorněn na obr. 4.10.



Obr. 4.10 Typické průběhy opotřebení  $VB$  a  $KT$  na době řezání [19]

Průběh opotřebení břitů nástroje je rozdělen do tří pásem:

- 1 – oblast zrychleného záběhového opotřebení.** Obecně souvisí se záběhem nástroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.
- 2 – oblast lineárního opotřebení.** Dochází k lineárnímu nárůstu opotřebení a intenzita je konstantní.
- 3 – oblast zrychleného nadměrného opotřebení.** Je to obvykle spojeno s teplotou řezání. Teplota se zvyšuje díky zvětšujícímu se tření nástroje na hřbetní ploše způsobenému větším opotřebením, což vede k ještě většímu nárůstu teploty a poklesu tvrdosti nástroje, nastává velmi rychlé, většinou lavinovité opotřebení.

Podle typu obrábění soustružení, frézování a podle nároků na obrobenou plochu (hrubování, dokončování) bývá stanovena kritická (dovolená) hodnota pro opotřebení např. tab. 4.1

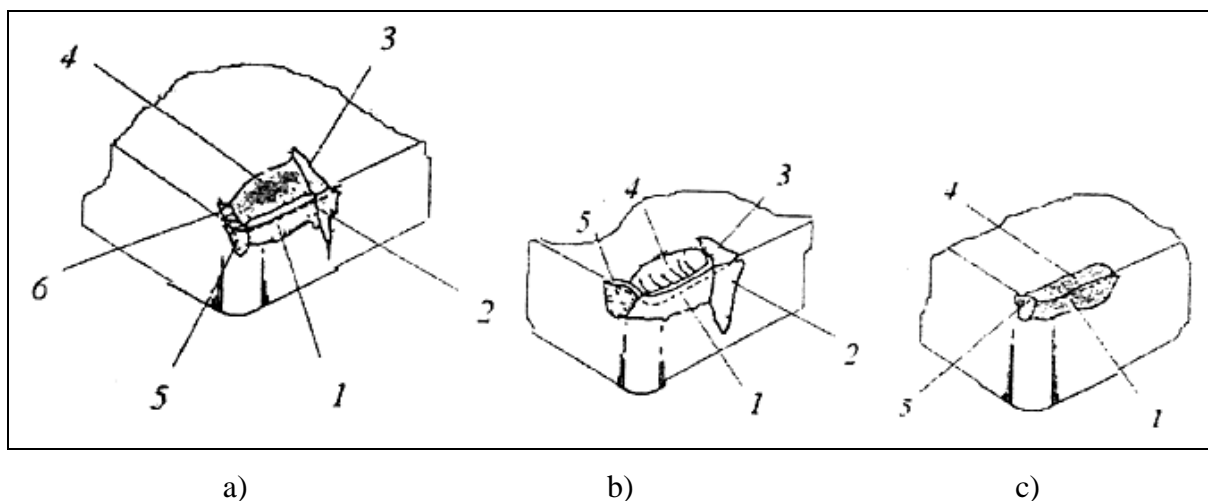
Tab. 4.1 Kritérium opotřebení pro některé typy obrábění [17]

Druh nástroje	Způsob práce	VB <sub>krit</sub> [mm]	Obráběný materiál
nůž RO ubírací	s chlazením	0,8-1	ocel
nůž SK WC+Co	f = 0,3 mm	0,8-1	litina
válcová frézy	hrubování	0,4-0,6	ocel
	na čisto	0,15-0,25	ocel
válcová frézy	hrubování	0,3 - 0,4	ocel
vrtáky z RO	vrtání	1 - 1,5	ocel
	vrtání	0,9-1,2	litina

Mnohdy není hlavním kritériem kritická hodnota opotřebení na hřbetě, ale podle průběhu opotřebení třeba hloubka čelního žlábků. Zvláště u hlubokých žlábků hrozí, že se propojí s oxidační hřbetní rýhou a dojde k destrukci nástroje. V některých případech může být důležitým kritériem radiální opotřebení a to z důvodů zachování rozměrové přesnosti výrobku.



Na obr. 4.11 jsou nákresy typických projevů opotřebení u několika základních druhů řezných materiálů.



a)

b)

c)

*Obr. 4.11 Typický projev opotřebení*

*a) rychlořezné oceli b) slinutého karbidu c) keramiky[17]*

- 1 - fazetka opotřebení na hřbetě,
- 2 - hřbetní (oxidační) rýha,
- 3 - drážka na čele,
- 4 - žlábek na čele,
- 5 - drážka na vedlejším hřbetě,
- 6 - drážka na čele.

Při experimentu je dáno kritérium opotřebení rozměry odporové vrstvy. Pro případnou změnu kritéria je třeba vyrobit VBD s potřebnými rozměry odporové vrstvy.

## 4.4. Metody měření opotřebení

Metody měření opotřebení se od sebe odlišují přístupem. Přímé metody mají snahu o zjištění fyzikálních veličin týkajících se přímo stavu nástroje tzn. ve většině případů je třeba obrábění přerušit a veličiny změřit. Nepřímé metody k opotřebení nástroje přistupují přes měření fyzikálních veličin doprovodných procesů, které obrábění provází, tudíž měření probíhá přímo při samotném procesu.

### 4.4.1. Přímé metody měření opotřebení

Přímé metody je těžké aplikovat v důsledku toho, že otupující se plochy jsou nedostupné pro měřicí přístroje. Pak je nutné obrábění přerušit, což ovlivňuje charakter otupení v dalších etapách experimentu. Kromě toho se ve většině případů nástroj snímá z nožového držáku, a to přináší změny podmínek obrábění při dalším upnutí a ustavení. [3]

Mezi přímé metody patří:

- metoda nanesené odporové vrstvy,
- metoda váhová (hmotnostní),
- metoda radioaktivních izotopů (radioizotopová),
- metoda mikrometrická,
- metoda optická (stínová),
- metoda pneumatická.

**Při použití nanesené odporové vrstvy** může být opotřebení nástroje měřeno zvýšením elektrického odporu. V podstatě je vytvořen odporový obvod na břitu nástroje. Možnosti využití této metody zkoumá tato disertační práce.

**Při váhové metodě** jako míru opotřebení bereme úbytek hmotnosti řezného břitu. Tuto metodu nelze použít přímo během procesu obrábění na obráběcím stroji, ale je poměrně přesná a hmotnostní rozdíl určuje intenzitu opotřebení. Nevýhodou je pokud, když se při obrábění vytváří nárůstek. Potom zůstává část břitu ulpěná na destičce a znemožňuje přesné určení hmotnostního úbytku na nástroji. Lze ji použít téměř výhradně u nástrojů

s vyměnitelnými břitovými destičkami se zřetelem na malé úbytky hmotnosti při otupování nástroje.[3]

$$\Delta M = M_1 - M_2 \quad (4.1)$$

$\Delta M$  – hmotnostní úbytek [g],

$M_1$  – hmotnost destičky před otupením [g],

$M_2$  – hmotnost destičky po otupení [g].

**Metoda radioaktivních izotopů** (radioizotopová) je nejcitlivější a nejpresnější metoda určování hmotnostního úbytku destičky v závislosti na čase. Umožňuje určit hmotnostní úbytek, v řádech až 10–3 mg [12]. Využívá toho, že největší část opotřebovaného materiálu nástroje odchází třískou a jen zanedbatelné množství opotřebovaného nástrojového materiálu zůstává na obrobené ploše a neobrobené ploše místa řezu. Zcela minimální část materiálu nástroje odchází do ovzduší. Radioaktivním článkem je materiál nástroje. Aktivaci nástroje lze dosáhnout dvěma způsoby [3]:

1. Zavedením radioizotopu již při hutnickém procesu. Potom lze přesně stanovit specifickou aktivitu nástrojového materiálu a změnu aktivity v průběhu času.
2. Ozářením hotového nástroje proudem neutronů v reaktoru. Vznikne tak směs radioizotopových prvků tvořící nástrojový materiál.

Postup měření je následující. Za daných řezných podmínek se odebere stanovené množství třísek aktivním nástrojem. Z obrobené a neobrobené vrstvy plochy řezu se odebere tenká vrstva neaktivním nástrojem. Oba vzorky třísek se vloží do měřicího bloku, který se skládá ze zkumavek a Geiger-Müllerových nebo scintilačních počítačů [12]. Ty jsou zapojeny na indikační zařízení skládající se ze zdroje vysokého napětí a číslicového reduktoru. Na základě aktivity třísek  $I_{tr}$  (počet impulzů za minutu) je možné stanovit množství nástrojového materiálu, který ulpěl na tříse, ploše řezu a obrobené ploše. Pro stanovení hmotnostního úbytku nástroje je nutné znát specifickou aktivitu  $i_n$  v impulsech za minutu, stanovenou stejným způsobem jako aktivita třísek podle [12].

$$i_n = \frac{I_n}{M_n} \quad (4.2)$$

$i_n$  – specifická aktivita nástroje,

$I_n$  – aktivita nástroje,

$M_n$  – zkoumané množství nástrojového materiálu.

Hmotnost opotřeбенého materiálu nástroje se potom stanoví podle [12]:

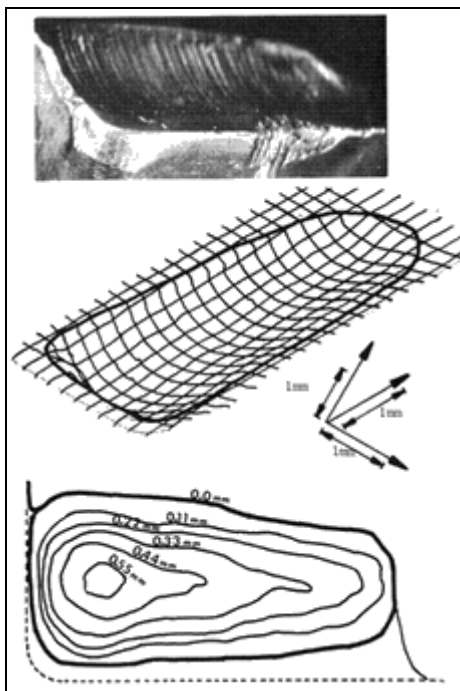
$$m_{mat} = \frac{I_{tr}}{i_n} \quad (4.3)$$

$m_{mat}$  – hmotnost opotřebovaného materiálu,

$I_{tr}$  – aktivita třísek.

Tato metoda s sebou nese riziko zdravotního ohrožení a při práci a manipulaci je nutné dbát přísných bezpečnostních opatření a používat rukavic, manipulátorů a olověných zástěr a desek.

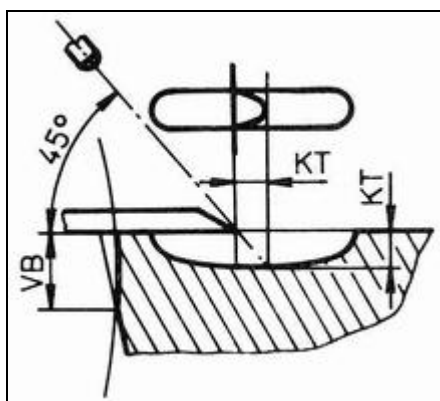
**Mikrometrická metoda** využívá měření délkových rozměrů opotřeбенí. K měření opotřeбенí VBD používáme nejčastěji dílenské mikroskopy s křížovým stolem viz. obr. 6.17 v kapitole 6.5 Měřicí zařízení použité při experimentu. Hloubku žlábků měříme číselníkovými úchylkoměry, komparátory, a pod. Většinou je použití této metody omezeno nutností vyjmutí nožového držáku nebo VBD a změření opotřeбенí mimo stroj na mikroskopu.



Obr. 4.12 Příklad opotřeбенí na čele nástroje, profilu kráteru a jeho mapy [13]

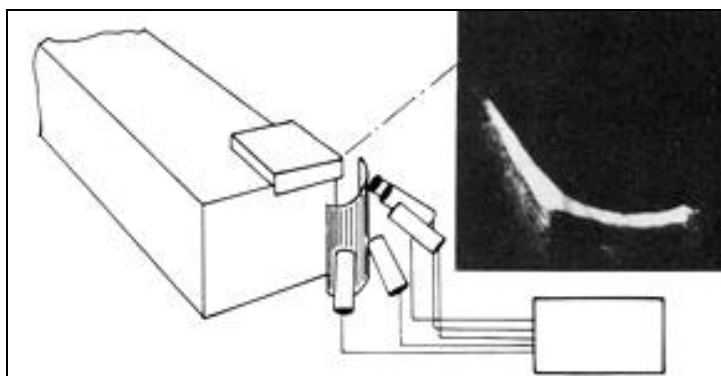
Také je možné využít 3D souřadnicové stroje na vytvoření skutečného obrazu opotřebení [13]. Na obr. 4.12 je příklad takového měření. Tato metoda umožňuje vytvořit reálný trojrozměrný obraz a je vhodná především pro měření opotřebení na čele nástroje. Na základě údajů je možné potom vytvořit charakteristickou mapu opotřebení a z ní odečíst parametry opotřebení jako KT, KM a podobně.

**Optická (stínová) metoda** se používá k měření hloubky žlábků. Umístíme-li ostrou hranu na čelo a osvětlíme ji paprskem světla pod úhlem  $45^\circ$ , pak vzdálenost tečny ke stínu je rovna hloubce žlábků KT (obr. 4.13).



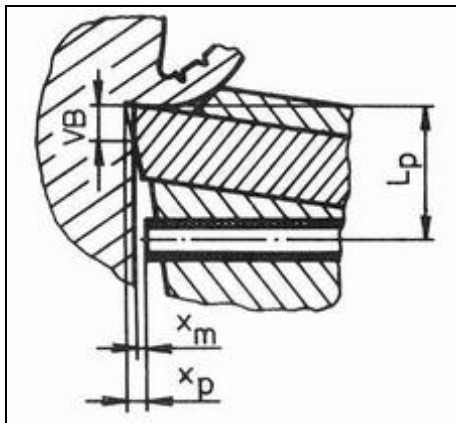
Obr. 4.13 Schéma měření stínovou metodou [14]

Další metodou, jež využívá na měření opotřebení vytváření stínů, je metoda založená na měření opotřebení na čele nástroje. Na čele nástroje je difusorem (obr. 4.14) vytvořena charakteristická mřížka, která je snímána prostřednictvím kamery, přičemž deformace mřížky souvisí s vytvářením kráteru na čele nástroje. Na základě obrazu z kamery je možné vytvořit skutečný trojrozměrný obraz opotřebení čela nástroje.



Obr. 4.14 Způsob osvětlení čela nástroje [15]

**Pneumatická metoda** je poměrně spolehlivá a konstrukčně jednoduchá. Měření úbytku vyměnitelné břitové destičky ve směru kolmém k ploše řezu nebo ve směru radiálním. Princip měření je na obr. 4.15.



Obr. 4.15 Princip měření pneumatickou metodou [14]

Geometrické poměry lze odvodit s uvažováním vlivu drsnosti na velikost měřené hodnoty opotřebení pro nůž s úhlem nastavení  $\kappa_r = 90^\circ$  [14]:

$$VB = VB_o + K_m \cdot VB_o^{0,81}$$

$$VB_o = \left( x_p - \frac{L_p \cdot f}{\pi \cdot D_o} - x_m \right) \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_n} \quad (4.4)$$

$K_m$  – konstanta daná konstrukcí měřidla (určuje se empiricky),

$x_p$  – vzdálenost trysky od obrobku obr. 4.15 [mm],

$x_m$  – vzdálenost nástroje od trysky obr. 4.15 [mm],

$L_p$  – vzdálenost osy trysky od špičky nástroje [mm],

$f$  – posuv [mm],

$D_o$  – průměr obrobku [mm],

$\alpha_n$  – úhel hřbetu [°].

Hodnota  $x_m$  se určuje pro tlak vzduchu změřený z cejchovní křivky daného měřidla.

#### 4.4.2. Nepřímé metody měření opotřebení

Metody nepřímé se opírají o některé znaky, které proces opotřebování doprovází a provádí se přímo při procesu řezání. Všechny tyto metody jsou pouze přibližné [4] [5],. Patří sem: [4] [14] [16] [5]

- vznik lesklého proužku na povrchu obrobku,
- vzrůst složek řezné síly,
- zvýšení výkonu řezání,
- zvýšení teploty řezání,
- vznik chvění nebo nežádoucího doprovodného zvuku,
- změna barvy a tvaru třísky,
- změna rozměrů obrobku,
- zhoršení drsnosti povrchu,
- emise signálů v pásmu ultrazvuku (akustická emise).

**Optické metody** se jeví jako slibné, ovšem spolehlivost může při praktickém použití činit velké problémy. [3]

**Metoda založená na odrazu světla** využívá určité množství světla ve světelném paprsku, které dopadá na ostří nástroje. Charakteristika odraženého světla pak závisí na stavu opotřebení povrchu nástroje [16]. Tato metoda je jednoduchá a dá se použít pro frézování a broušení.

**Metoda zpracování odraženého paprsku** založená na optické Fourierově transformaci k měření opotřebení povrchu brusného kotouče. Optický obrazec nese několik informací (šířku odlesku poškozených zrn, plochu poškozených zrn, velikost a počet zrn). Stav brusného kotouče lze určit v reálném čase ze střední plochy odlesku poškozených zrn.

**Metoda využívající televizní kamery** je určena především pro soustružení. Nástroj se po pracovním cyklu přemístí do testovací polohy před televizní kameru. Sejmутý obraz je analyzován pomocí mikroprocesoru tak, aby poskytl informace o poškození a velikosti opotřebení [16]. Nástroj je postupně osvětčován ze 4 stran (pod různými úhly), aby bylo možné zhotovit 3D obraz opotřebení nástroje. Z odlesků a vržených stínů jsou pak vypočteny

skutečné rozměry opotřebení. Takto lze hlídat, pokud zadáme předem kritéria, dovolené opotřebení nástroje.[3]

**Měření pomocí síly řezání a krouticího momentu** využívá skutečnost, že s rostoucí velikostí opotřebení roste obvykle i řezný odpor. Podstatou měření jednotlivých složek řezné síly a krouticího momentu je měření deformací, ke kterým dochází v soustavě stroj – nástroj – obrobek – přípravek během obrábění. Obě tyto veličiny lze měřit pomocí dynamometrů a krouticí moment též na vřeteníku. [3]

**Měření sil pomocí dynamometrů** je pravděpodobně jednou z nejrozšířenějších veličin ve strojírenské výrobě, kdy velikost opotřebení VBD koresponduje s nárůstem řezných sil.

**Metoda měřící dynamickou složku řezné síly** je zaměřena na spektrální analýzu síly. Hledá se určitá závislost mezi opotřebením nástroje a rozmístěním piků nebo amplitud dynamické složky síly řezání [16].

**Měření výkonu** slouží k určení řezných sil pomocí wattmetru nebo pomocí měření elektrického proudu. Metoda je málo citlivá na změny při kontinuálním opotřebením nástroje a je vhodná spíše pro určení katastrofického opotřebení nástroje.

Měření opotřebení při **detekci mezery mezi nástrojem a obrobkem** je založeno na změně vzdálenosti mezi obráběným povrchem a bodem na ostří nebo držáku nástroje.

### **Metody dotykové**

Využívá se zde mechanického kontaktu s obráběným povrchem.

*Pomocí elektrického mikrometru*, kdy je mechanický dotyk v kontaktu s obráběným povrchem ze strany ostří nástroje. Se zvětšujícím se opotřebením se dotyk přemísťuje a výstup z měniče dává údaje o opotřebením. [3]

*Měření využívající vířivých proudů*, v tomto případě je mechanický dotyk vyroben z karbidu wolframu (pro svou velkou otěruvzdornost). [3]



### **Metody bezkontaktní**

*Pneumatická* – využívá pneumatického snímače, který měří vzdálenost mezi tryskou umístěnou pod ostřím a obráběným povrchem. Výhodou je, že se obrobený povrch očistí od procesní kapaliny.

*Metoda ultrazvukového mikrometru* – využívá času průchodu ultrazvukového pulsu vyslaného z vysílače, odraženého od obráběného povrchu a registrovaného přijímačem [16].

*Metoda optického mikrometru* – paprsek HeNe laseru je zaměřen na obrobený povrch, pod určitým úhlem se odráží a je registrován fotodetektorem. Změna od nastaveného úhlu je proporcionální opotřebení nástroje [16].

*Při metodě kapacitní* se mezi obrobek a nástroj vkládá kovová destička. Při zapojení do jednosměrného napětí se vytvoří kondenzátor s konstantní kapacitou mezi nástrojem a destičkou a současně, protože nástroj a obrobek jsou vodivě spojeny třískou, kondenzátor mezi destičkou a obrobkem. Kapacita se mění v závislosti na změně rozměru obrobku. [16]

**Měření prostřednictvím vibrací** spočívá na korelaci mezi vibracemi obráběcího stroje a opotřebením nástroje. Úspěšně byla aplikována pouze v laboratoři.

### **Pomocí akcelerometru.**

Snímač tvoří většinou piezoelektrický akcelerometr snímající vibrace a samobuzené kmity. Nevýhodou je ovlivňování monitorovaného stroje okolními vibracemi a hlukem. Pokud změříme vertikální vibrace, lze z amplitudy nalézt limitní opotřebení nástroje. Pokud frekvence rozdělíme do diskrétních pásem, je možné analýzou získat spojitost mezi opotřebením nástroje a spektrem. Z modelování vibrací z akcelerometru lze registrovat signál citlivý na opotřebení umístěním snímače na držák nástroje. [16]

### **Metoda využívající kyvadlo.**

Opotřebení nástroje je oceňováno útlumem vibrací impulsně generovaných úderem kyvadlového kladívka. Vibrace jsou snímány tenzometry umístěnými na držáku nože. Výhodou je, že tato metoda není závislá na řezných podmínkách. [16]

### **Metoda využívající kolísání otáček vřetene.**

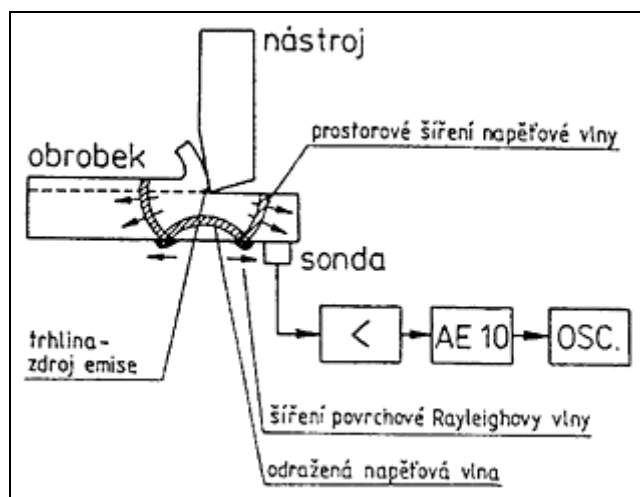
Opotřebení nástroje je identifikováno prostřednictvím oscilace řezné rychlosti, nebo otáček vřetene. Umožňuje identifikovat především lom nástroje na základě charakteristických projevů v signále případně frekvenčním spektrogramu. [16]

**Měření zvuku** pomocí akcelerometru umístěného v blízkosti držáku jsou snímány zvukové vibrace od tření hřbetu nástroje. Získané frekvence jsou rozděleny na vysoké a nízké a jejich poměr poskytuje informaci o opotřebení nástroje [16].

**Pomocí mikrofону**, kdy jsou zvuky sbírány a analyzovány metodou spektrální analýzy. Na spektru se s růstem opotřebení začínou objevovat nárůstky amplitud některých frekvencí.

Při **měření akustické emise** jsou registrovány a vyhodnocovány ultrazvukové povrchové napěťové vlny, které nesou informaci o procesu probíhající v kořeni třísky. Výhodou je jednoduché umístění snímače (např. do trysky přívodu řezné kapaliny [16]). Je to jedna z perspektivních metod a má předpoklady použití ve výrobní praxi. Ovšem má svá ohraničení. Schéma měření je na obr. 4.16.

Signál akustické emise je vhodný ke sledování stavu obráběcího nástroje zejména v oblasti ultrazvuku, pro jeho široký frekvenční rozsah. Výhodou tohoto rozsahu je eliminace vlivu prostředí a vlastních kmitů stroje, které leží převážně ve slyšitelném pásmu zvukového spektra. Signál akustické emise je měřitelný nepřetržitě během celého procesu obrábění, což je dáno tím, že jeho vznik je spojen s fyzikální podstatou tvorby třísky.



Obr. 4.16 Schéma experimentálního zařízení na měření akustických emisí [16]

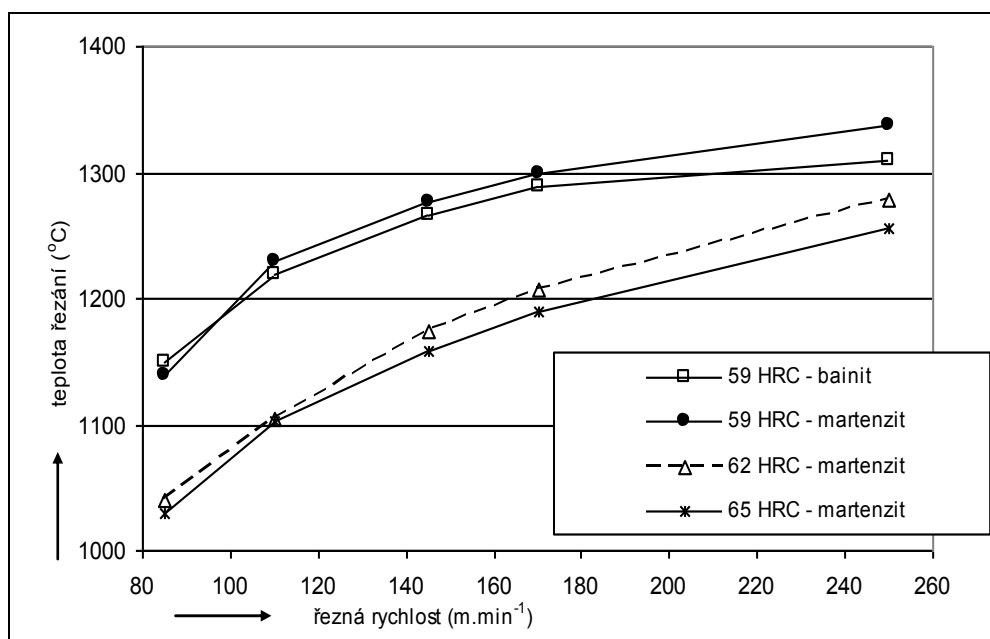
Podle nejnovějších výzkumů je možné použít speciální fólie, která je citlivá na povrchové napěťové vlny a nanáší se přímo na břitovou destičku [16].

Velikost opotřebení ovlivňuje také **teplotu řezání**, proto existují metody založené na jejím měření.

## 5. Měření teplot

Teplota řezání je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících proces obrábění a má vliv na všechny parametry řezání. Závisí na ní možnosti nasazení různých druhů řezných materiálů, které mají různou tepelnou odolnost, vhodnost použití různých řezných rychlostí, posuvů a hloubky řezu. Z výše uvedených skutečností vyplývá, že teplota nepřímo, ale zásadně ovlivňuje produktivitu a ekonomičnost výroby.

Na obr. 5.1 je uveden graf naměřené teploty pro různé řezné rychlosti při použití nástroje z povlakovaného keramického materiálu.



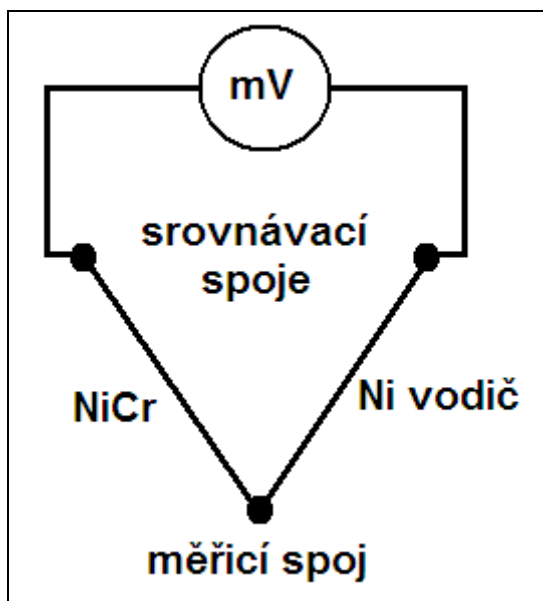
Obr. 5.1 Závislost teploty řezání na řezné rychlosti,  $a_p=0,25$  mm,  $Al_2O_3+TiC$  (TiN povlak DNGA150408), 100Cr6,  $f=0,09$  mm, kroužky  $\varnothing$  50 mm, VB 0,1 mm [23]

Pro měření teploty lze využít celou řadu fyzikálních nebo chemických jevů. Vzhledem k náročnosti a specifickým podmínkám procesu obrábění lze použít pouze některé z metod. Při experimentálním stanovování a při praktických měřeních se využívá především těchto jevů [27]:

- termoelektrický jev (termočlánky),
- změna elektrického odporu (termistory),
- tepelné záření (pyrometry, termovize, fotometrie),
- změna struktury (teploměrné křídly a barvy).

## 5.1. Termočlánky

Při měření termočlánky se využívá tzv. termoelektrického jevu. Tento jev využívá vzniku termoelektrického napětí (termoelektrický - Seebeckův jev), v obvodu tvořeném dvěma různými vodiči, jejichž konce jsou vodivě spojeny, jestliže jsou oba spoje udržovány na různých teplotách. Při obrábění se ho využije tak, že měřicí spoj je umístěn do místa měření teploty  $\theta_m$  a srovnávací spoj je udržován na známé teplotě  $\theta_o$  (obvykle teplota okolí). K těmto vodičům je pak připojen milivoltmetr (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Schéma zapojení termočlánku[3]

Pro praktická měření teploty lze využít jen některé dvojice kovů nebo slitin. Musí být sestaveny tak, aby vzniklé termoelektrické napětí bylo dostatečně velké v rozsahu předpokládaných teplot.

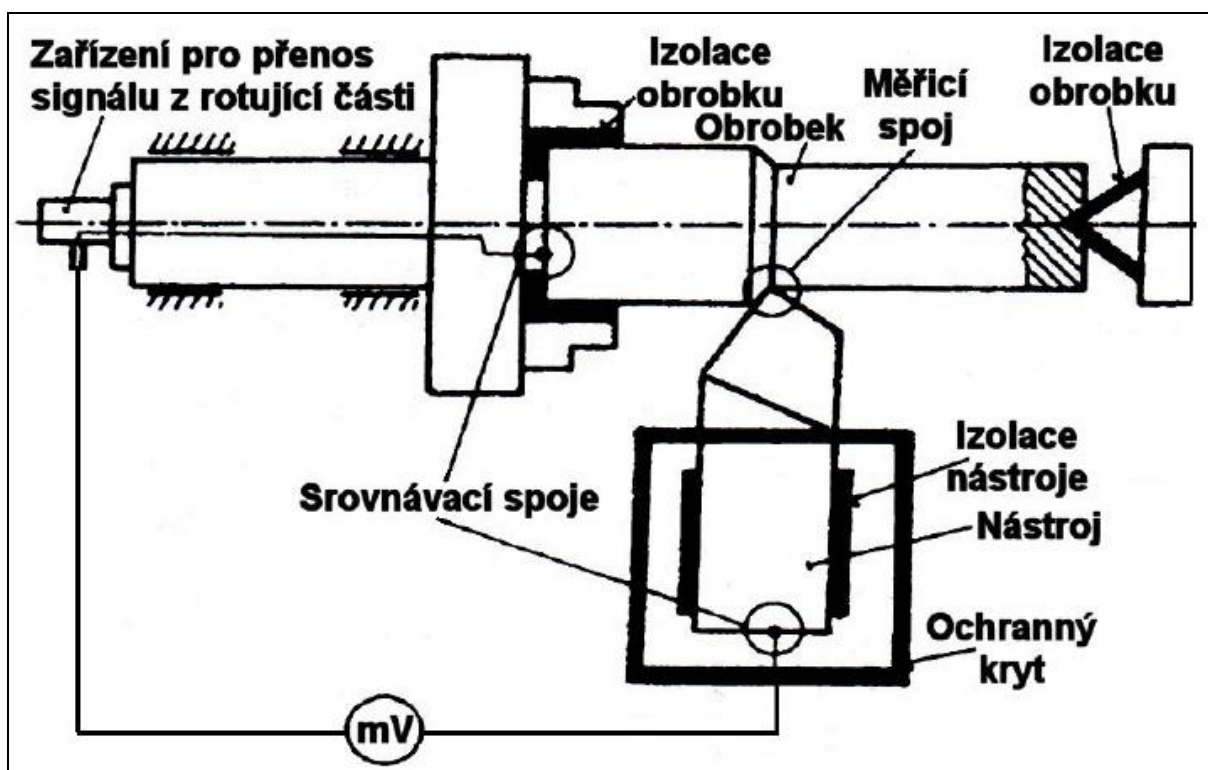
Termočlánky pro měření teploty řezného nástroje mají různou konstrukci:

- termočlánek přirozený ,
- termočlánek poloumělý,
- termočlánek umělý.

### 5.1.1. Termočlánek přirozený

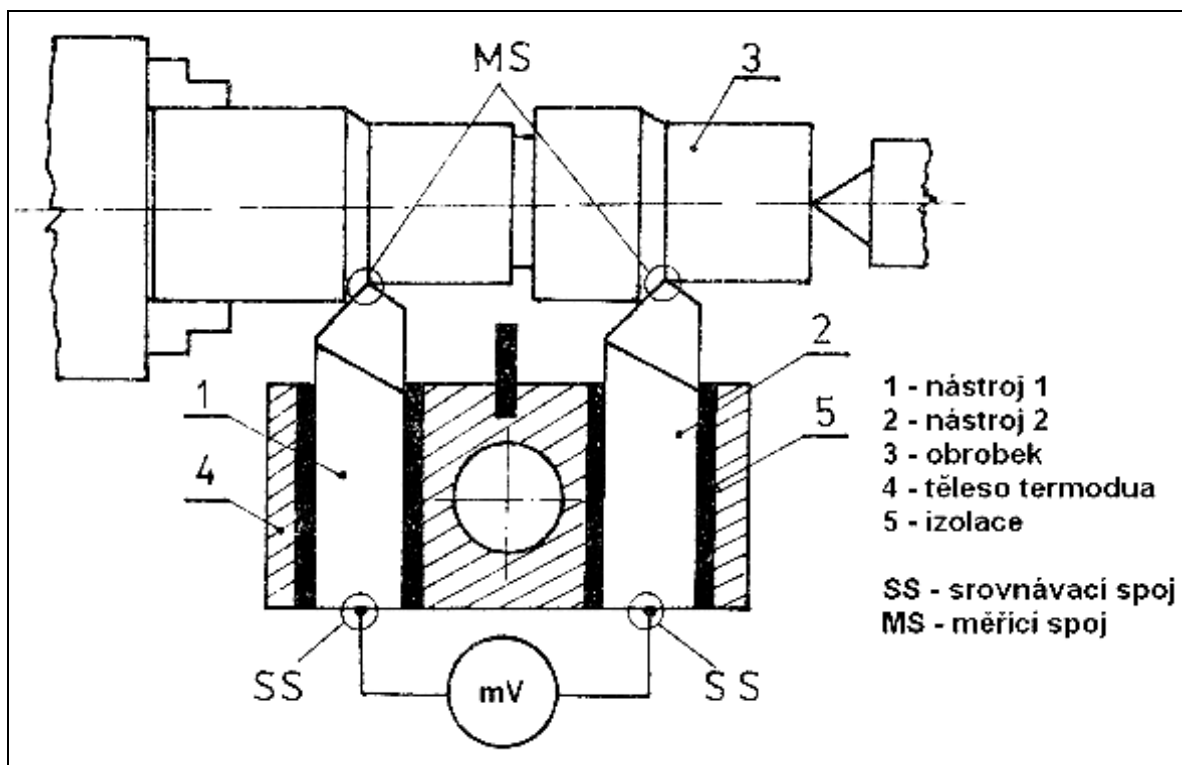
Přirozený termočlánek, jak napovídá sám název, je bez přídavného cizího vodiče. Jedním z vodičů je materiál nástroje a druhým materiál obrobku. Měřicí spoj je přímo v místě styku břitu nástroje s obrobkem, tzn. na ploše styku třísky s čelem a hřbetu s plochou řezu. Termoelektrické napětí je potom úměrné střední teplotě v oblasti styku – teplotě řezání [29]. Na ploše styku vzniká soustava elementárních termočlánků s různou teplotou v jednotlivých bodech. Výsledné napětí je proto aritmetickým průměrem termoelektrických napětí těchto mikročlánků.

Schéma měření je na obr. 5.3. Nutnou podmínkou je vzájemné odizolování nástroje a obrobku. Při běžných měřeních většinou postačuje odizolování nástroje od obráběcího stroje, ale pro zvýšení spolehlivosti a přesnosti měření je účelné odizolovat od stroje i obrobek. Nevýhodou přirozených termočlánků je nutnost obtížného a zdoluhavého cejchování systémů pro každou dvojici materiálů nástroje a obrobku.



Obr. 5.3 Přirozený termočlánek[25]

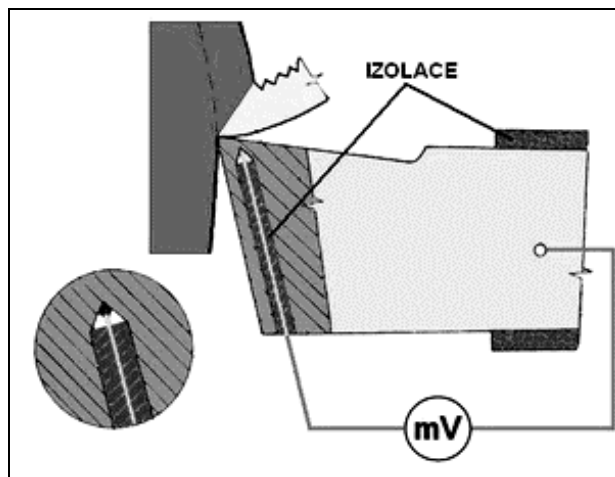
Přirozený termočlánek může být konstruován i jako termoduo, kdy jsou pro jeho vytvoření využity dva nástroje z různých materiálů nebo v případě frézování dva materiály. Schéma zapojení termodua – viz. obr. 5.4.



Obr. 5.4 Schéma zapojení termodua[25]

### 5.1.2. Poloumělý termočlánek

Při *poloumělém* termočlátku je jeden vodič termočlátku materiál nástroje nebo obrobku a druhý cizí vodič vodivě spojený v místě řezu. Na rozdíl od umělých termočládků jsou více použitelné vzhledem k malým rozměrům cizího vodiče, který lze snáze umístit do místa měření. Jeho využití závisí na možnostech umístění izolovaného vodiče do místa řezu a jeho vodivé spojení s materiálem obrobku nebo nástroje. Schéma zapojení viz. obr. 5.5.

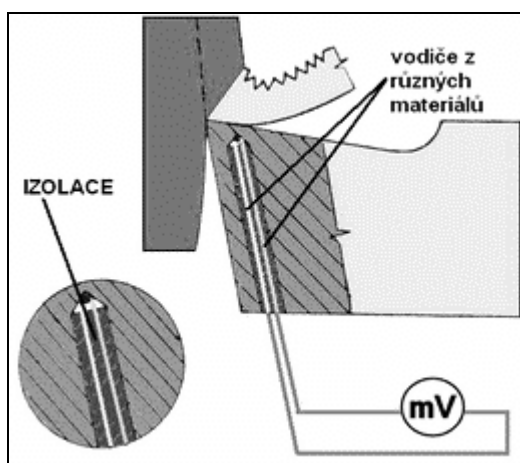


Obr. 5.5 Schéma zapojení poloumělého termočlánu [25]

### 5.1.3. Umělý termočlánek

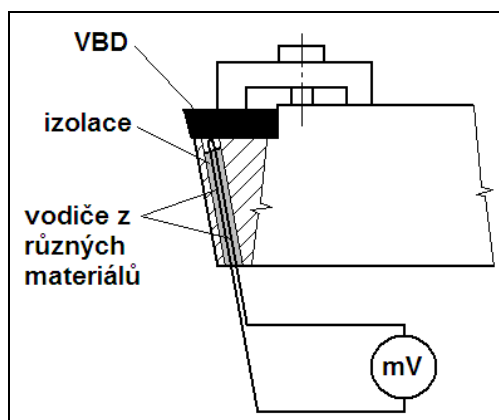
Podstatou umělého termočlánu je přímé umístění termočlánu do místa řezu (měření teploty). S pomocí těchto dvou cizích vodičů lze měřit teplotu v různých místech nástroje i obrobku, kromě stykových ploch bříty s třískou a plochou řezu. Nejčastěji se používá k měření teploty na bříty nástroje.

Upravený a izolovaný termočlánek se vloží na dno otvoru v nástroji (obr. 5.6). Vlastní zabudování termočlánu do nástroje je poměrně složité a lze jen obtížně určit přesnou polohu umístění měřicího spoje termočlánu. Tato poloha zároveň mění i podmínky vedení tepla a často znehodnocuje obráběcí nástroj.



Obr. 5.6 Schéma zapojení umělého termočlánu[25]

Proto se častěji používá nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou (slnutý karbid). Termočlánek je stabilně zabudovaný v nástroji a snímá teplotu na dolní ploše břitové destičky (obr. 5.7).



Obr. 5.7 Umělý termočlánek pro nástroj s vyměnitelnou břitovou destičkou[28]

## 5.2. Termistory

Pod pojmem termistory rozumíme nelineární elektrické součástky charakterizované vysokou závislostí jejich elektrického odporu ke změně teploty. Teplotní koeficient odporu je nejméně pětkrát, v některých případech však i padesátkrát větší než u kovových vodičů (mědi), což umožňuje jejich výhodné použití v různých obvodech měřicí, regulační, automatizační a sdělovací techniky. Použití termistorů je založeno jednak na změně odporu termistorového čidla se změnou teploty prostředí, které termistor obklopuje. [30]

Největším problémem při tomto měření bylo nastavení požadované hodnoty proudu, neboť zapojení reagovalo velice citlivě na změnu parametrů zdroje proudu. Dále při vyšších proudech bylo nutno počkat, než se ustálí teplota termistoru[32].

Tepelná setrvačnost termistoru i platinového teploměru hrála značnou roli při měření závislosti odporu termistoru na teplotě. Zvláště v těch fázích měření, kdy docházelo k rychlým změnám teploty je možné (a pravděpodobné), že teplota termistoru byla jiná než teplota, která byla indikována teploměrem. Dále je nutno zvážit vliv odporu vodičů a přechodových odporů při měření odporu teploměru. Tyto vlivy mohly do měření vnášet systematickou chybu zhruba na úrovni 1-2%. [32]

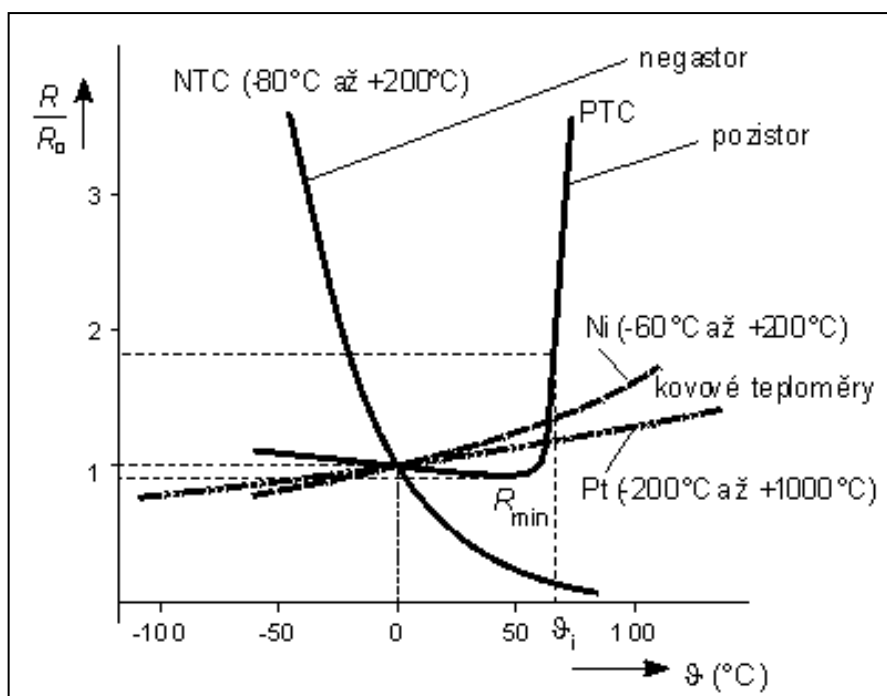


Rozlišujeme dva druhy termistorů, jejichž elektrický odpor je značně závislý na teplotě :

- termistory se záporným teplotním součinitelem (NTC – *Negative Temperature Coefficient*), kde elektrický odpor s rostoucí teplotou klesá,
- termistory s kladným teplotním součinitelem (PTC – *Positive Temperature Coefficient*), kde elektrický odpor s rostoucí teplotou vzrůstá.

Rozmezí teplotního použití termistorů bývá od  $-200^{\circ}\text{C}$  do  $+300^{\circ}\text{C}$ . Termistory jsou vyráběny spékáním z práškových kysličníkových materiálů (např.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CoO}$ ,  $\text{BaO}$  apod.), které se po vytváření podrobují spékání za předepsaných podmínek, montáži vývodů a konečné úpravě, zahrnující též stabilizaci elektrických parametrů tepelným nebo proudovým vystárnutím.[30]

U PTC termistorů je odpor při nízkých teplotách malý. Od určité hodnoty teploty jejich odpor prudce roste. Naproti tomu termistory NTC mají klesající charakteristiku závislosti odporu na teplotě, která se neprojevuje skokovou změnou chování jako u termistoru PTC viz . obr. 5.8.



Obr. 5.8 Charakteristické závislosti termistorů na teplotě [30]

**Termistory NTC** se vyznačují negativním teplotním koeficientem odporu, jehož hodnota je většinou asi 10x vyšší než u kovových vodičů. Teplotní průběh odporu termistoru NTC lze v rozmezí teplot je vyjádřen vztahem.[30]:

$$R = R_0 \cdot e^{B \cdot \left( \frac{1}{\theta_0} - \frac{1}{\theta} \right)} \quad (5.3)$$

$R, R_0$  – elektrické odpory termistorů při teplotě  $\theta, \theta_0$  [ $\Omega$ ]

$B$  – materiálová konstanta [K].

Skutečný teplotní průběh odporu termistoru NTC neodpovídá přesně výše uvedenému vztahu, protože i tzv. “konstanta  $B$ ” jeví malou teplotní závislost, a dochází většinou k vzestupu hodnoty konstanty  $B$  se vzrůstem teploty. V intervalu dvou teplot, při nichž “konstanta  $B$ ” byla změřena, lze však hodnotu  $B$  považovat zhruba za konstantní a to tím přesněji, čím menší je zmíněný teplotní interval

**Termistory PTC** se vyznačují kladným teplotním součinitelem podobně jako u kovových teploměrů.

S rostoucí teplotou se v kovech zvětšuje amplituda tepelného pohybu atomů, zkracuje střední doba mezi srážkami elektronů s tepelnými kmity mřížky, a tím dochází k růstu měrného odporu s teplotou. Tento růst můžeme vyjádřit zjednodušeným vztahem[32]:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta \theta) \quad (5.4)$$

$R$ ...elektrický odpor termistoru při teplotě  $\theta$  [ $\Omega$ ]

$R_0$ ...elektrický odpor termistoru při výchozí teplotě  $\theta_0$  [ $\Omega$ ]

$\alpha$  .....teplotní součinitel měrného elektrického odporu  $\alpha$  zjištěný při teplotě  $\theta_0 = 20[^\circ\text{C}]$ .

### 5.3. Pyrometry

Klasifikace pyrometrů:

- radiační (měří úhrnné záření, tj. celkovou energii vyzařovanou v určitém směru v celém spektru vlnových délek),
- fotoelektrické (měří pásmové záření, tj. záření v úzkém pásmu vlnových délek, vymezeném použitou optikou, filtry a spektrální citlivostí snímačů),
- spektrální (jasové - využívají úzkou oblast viditelného pásma záření),

- barvové (nazývané též distribuční - využívají oblast viditelného záření a teplotu měří prostřednictvím tzv. barevné teploty). Barevná teplota zářiče je teplota černého zářiče, při níž má jeho záření v určitém oboru spektra stejné poměrné spektrální rozložení jako daný zářič. [25]

### 5.3.1. Metody určování a odstraňování vlivu emisivity

Emisivita je definovaná jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa  $H_E$  k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa  $H_{EO}$  se stejnou teplotou a určuje tak schopnost reálného tělesa vyzařovat teplo. Je bezrozměrná veličina.

- Emisivita absolutně černého tělesa  $\varepsilon$  má hodnotu  $\varepsilon = 1$ .
- Emisivita reálného tělesa  $\varepsilon_T$ , nabývá tedy hodnot  $\varepsilon_T \leq 1$ .

Pokud je potřeba zjistit hodnotu emisivity nějakého materiálu, je nejprve snaha vyhledat ji v tabulkách (příloha č. 2). Ty mohou být součástí dokumentace pyrometru, dají se vyhledat v různých příručkách o měření teploty a dají se rovněž najít na internetu. V tabulkách bývají obvykle uvedeny hodnoty celkové a spektrální emisivity.

Celková emisivita poskytuje informaci o hodnotě emisivity pro měření širokopásmovými pyrometry, pokud většina energie záření leží v spektrálním pásmu pyrometru. Spektrální emisivita poskytuje informaci o hodnotě emisivity pro měření úzkopásmovými pyrometry. Bývá udávána pro určitou efektivní vlnovou délku. [18]

Pokud je nalezena v tabulkách nebo odborné literatuře hodnota emisivity, která odpovídá typu použitého pyrometru, stavu povrchu měřeného materiálu a požadovanému rozsahu teplot, může být problém vyřešen. Poměrně často však požadovaná množina informací není úplná, a pak je potřeba se obrátit na specializované pracoviště nebo se pokusit určit emisivitu vlastními prostředky.

Některé metody pro určení emisivity [18]:

- a) proměření vzorku ve specializované laboratoři,
- b) zvýšení emisivity povrchu materiálu překrytím jeho povrchu černou páskou nebo nástřikem speciální tepelně odolné barvy s  $\varepsilon \approx 1$ ,

- c) proměření teplotních charakteristik vzorku materiálu,
- d) kontrola měřené teploty dotykovým měřidlem,
- e) porovnání radiačního měření s údajem poměrového pyrometru.

ad a) Pokud je třeba měřit teplotu materiálu, která je na povrchu vzorku tohoto materiálu blízká pokojové teplotě, je možné nechat změřit emisivitu na specializovaném pracovišti.

ad b) Pro nízké teploty (do cca. 250 °C) je možno použít k určení skutečné teploty a emisivity měřeného povrchu položení speciální černé pásky na měřený povrch, ale musí být zajištěn dobrý přenos tepla z měřeného povrchu na vnější povrch této pásky.

Povrch materiálu je možno také nastříkat černým sprejem v měřeném místě. Tak se dosáhne lokálního zvýšení emisivity materiálu na hodnotu blízkou hodnotě  $\varepsilon \approx 1$ . Pyrometr má nastavenou hodnotu emisivity  $\varepsilon = 1$  nebo hodnotu emisivity udávanou výrobcem spreje. Tímto postupem dojde k výraznému zvýšení přesnosti měření, které pak může být považováno za absolutní. Tato metoda je vhodná pro nižší teploty.

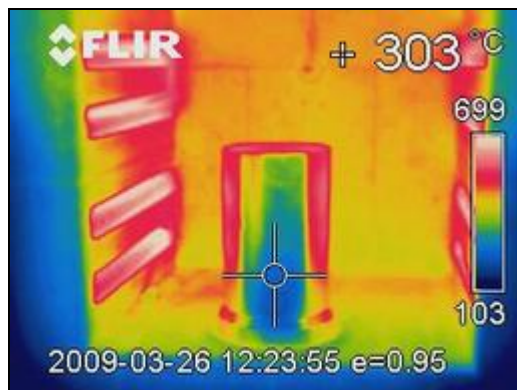
Některé firmy nabízejí tyto spreje až do teploty 700 °C (např. Wahl: Emisivity Coating Black Spray Paint  $\varepsilon = 0,95$  do 730 °C). Jejich využití pro kontinuální měření není vhodné. Tyto spreje však mohou pomoci velmi přesně určit emisivitu povrchu materiálu. Bohužel tento typ výrobků se u nás prozatím příliš nevyužívá a není ani příliš nabízen firmami, které se zabývají prodejem pyrometrů. [18]

ad c) Třetí metodou je ohřev vzorku materiálu v malé pícce, v níž je teplota vzorku měřena termočlánkem (obr. 5.9). Pyrometr je zaměřen na vzorek. Měří jeho povrchovou teplotu a zároveň je korekce emisivity pyrometru nastavena na takovou hodnotu, aby údaj termočlánku a pyrometru souhlasil s požadovanou přesností.

Tato jednoduchá metoda umožňuje stanovit pro konkrétní pyrometr a konkrétní materiál závislost emisivity na teplotě. Není však zcela jisté, zda průběh emisivity, který byl naměřen v laboratorních podmínkách, bude dostatečně přesně odpovídat chování emisivity materiálu v reálných podmínkách.

Podobnou metodou je metoda, při níž je na povrch vzorku materiálu, který je zezadu vyhříván, přiklopena zrcadlová dutina s malým otvorem ve vrcholu. Tak je vytvořen model jednoduchého černého zářiče. Otvorem ve vrcholu dutiny se pyrometrem změří teplota  $T_0$  při

nastavené korekci emisivity na hodnotu jedna. Potom se zrcadlová dutina skokově nahradí clonkou se stejným průměrem jako otvor ve vrcholu dutiny. Zaměřeným pyrometrem se potom pomocí točítka korekce emisivity nastaví údaj pyrometru tak, aby indikoval teplotu  $T_0$ . [18]



Obr. 5.9 Foto součásti v peci vyfocena termokamerou flir.

ad d) Nejužívanější metoda určování emisivity v provozních podmínkách je založena na současném měření teploty povrchu měřeného materiálu termočlánkem a pyrometrem. Teplota měřená pyrometrem se korekcí emisivity nastaví tak, aby se rovnala teplotě měřené kontaktním teploměrem. Tato metoda v praxi často představuje jedinou možnost správného nastavení a objektivizace měření, protože postihuje skutečně reálnou situaci při měření. Je však nutno zajistit, aby měl termočlánek s měřeným povrchem dobrý kontakt, aby byl schopen dostatečně rychle reagovat na změny měřené teploty a neodváděl z měřeného povrchu teplo. [18]

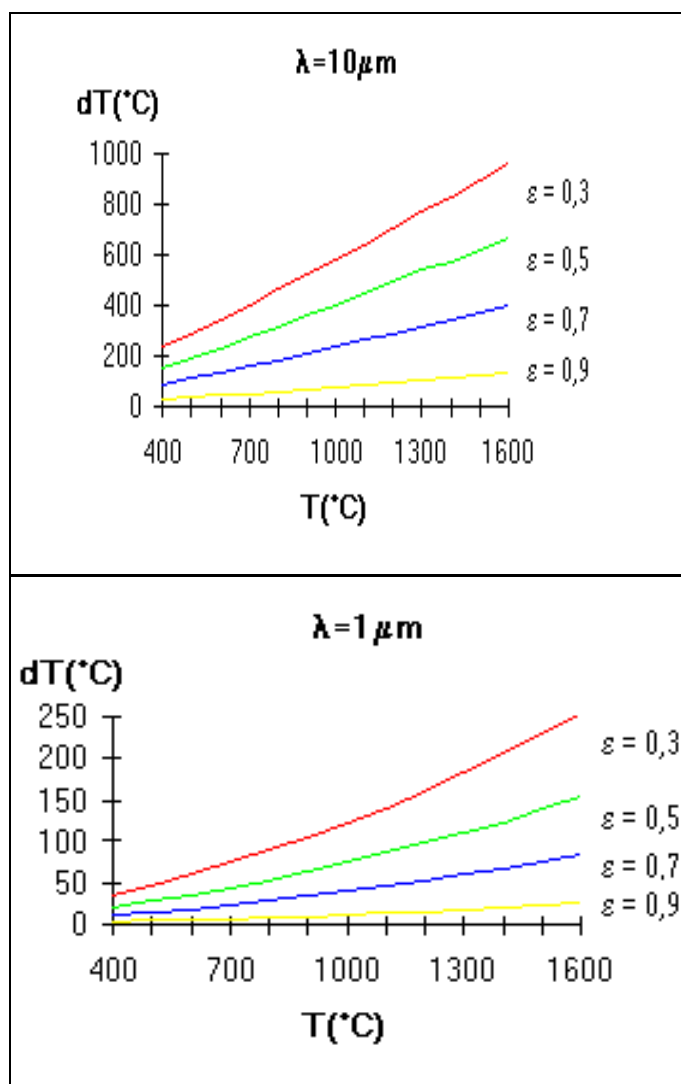
ad e) Je-li k dispozici poměrový pyrometr, který měří na vlnových délkách, kde se měřený materiál chová s dobrou přesností jako šedé těleso, můžeme údaj našeho radiačního pyrometru srovnat s údajem tohoto pyrometru. Tato metoda je přesná do té míry, do jaké se měřený materiál chová jako šedé těleso. Existují také pyrometry s laserovým měřením emisivity. Problém je ovšem v tom, že emisivita určena pomocí laseru je určena pouze na jedné určité vlnové délce. Měříme-li na jiné vlnové délce, zjištěná hodnota emisivity odpovídá skutečně pouze do té míry, do jaké se chová měřený materiál jako šedé těleso. [18]

### 5.3.2. Závislost chyby měření na emisivitě

Závislost chyby měření pyrometru  $dT$  na teplotě  $T$  a emisivitě  $\varepsilon$  pro vlnové délky  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  a  $\lambda = 10 \mu\text{m}$  znázorňují následující grafy na obr. 5.10.

Z těchto grafů je patrné, že pyrometry pracující na kratších vlnových délkách mají mnohem menší chybu vzhledem k emisivitě.

Infrapyrometr MAURER - KTR 1085-1 pracuje na vlnové délce  $\lambda = 0,85 - 1,1 \mu\text{m}$ . Díky tomuto grafu je patrné že zmíněný infrapyrometr by měl maximální chybu měření  $50^\circ\text{C}$ , při měření  $1000^\circ\text{C}$  a případné chybě nastavení emisivity o 0,2.



Obr. 5.10 Závislost chyby měření pyrometru [18]

## 5.4. Měření pomocí termovize

Značně jsou rozšířeny termografické (termovizní) systémy, využívané ke snímání, zobrazování a vyhodnocování teplotních polí v mnoha oborech činnosti. Významné je i jejich použití ke sledování výrobních procesů a technologických zařízení prostřednictvím pevně (stabilně) zabudovaných termovizních systémů. On-line sledování míst s kritickou teplotou je přínosem nejen při sledování a řízení technologických procesů a zařízení, ale umožňuje také následně dokumentovat kvalitu výrobku. Z hlediska studia teplotních jevů při procesu obrábění představuje termovize velmi přesnou a progresivní metodu v experimentálním výzkumu teplot při řezání. Předností této metody je záznam i velmi rychlé změny teploty, což je důležité především pro posouzení dynamických jevů. Uspořádání je v podstatě obdobné jako u termokamery tzn., že je termovize umístěna na suportu a objektiv zaměřen přímo do oblasti řezu. Velkou výhodou tohoto profesionálního systému je možnost vybrat si ze snímku jeden či více bodů, kde můžeme mj. zjistit okamžité teploty v místě řezu či zobrazit celé teplotní pole obráběcího nástroje.[27]

## 5.5. Změna struktury, teploměrné křídly a barvy

Při identifikaci teplotního pole prostřednictvím fázových přeměn v nástroji je metodika omezená na rychlořezné oceli jako nástrojový materiál. Metoda využívá porovnání mikrostruktury nástroje po obrábění se souborem standardních vzorků, které byly ohřáté na různé teploty. Měření je založené zejména na analýze zhrubnutí sekundárně vyloučených karbidů. [3]

Teplotní indikátory jsou termochemické teploměry, kterými se dají určovat místa se stejnou teplotou, tzv. izotermy. Po nanesení těchto látek na povrch zkoumané součásti dochází po dosažení její určité teploty ke změně barvy, či skupenství. Teplotní pole lze tak získat poměrně rychle, bez náročných příprav na měření a bez poškození nástroje či obrobku. Nevýhodou tohoto měření je nemožnost získání přehledu o teplotě v místě styku obráběcího nástroje s třískou a výroba těchto látek je pouze pro malý rozsah teplot. Mezi nejpoužívanější indikátory patří [27]:

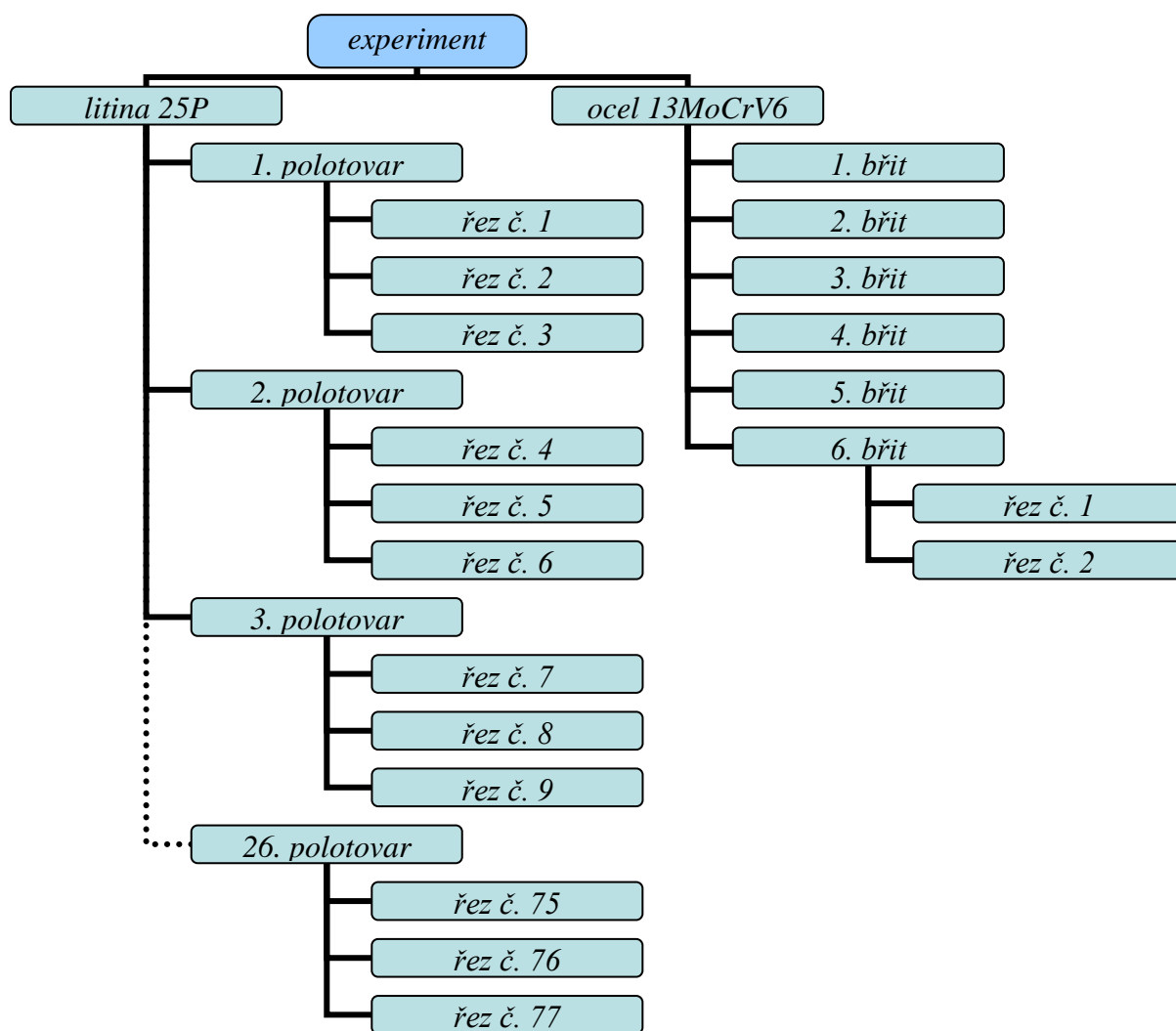
- teploměrné barvy (thermocolors),
- teploměrné tužky (thermocrayons),
- teploměrné křídly nebo vosky.

Teploměrné barvy jsou chemické nátěry, které při dosažení určité teploty (tzv. teplota zvratu) změní svou původní barvu. Ve formě prášku se před použitím rozmíchají v alkoholu. Mohou být také v tekutém stavu, případně jako sprej. Nanáší se před ohřevem. Teplotní rozsah bývá od 40 °C do 1400 °C. V místě teplotního zvratu se změní barevná stopa. Teploměrné tužky na rozdíl od barev se nanáší obvykle na ohřátý povrch. Bývají jednozvratné nebo dvojzvratné (dosahují dvou barevných změn při dvou teplotách zvratu). Teplotní rozsah bývá až do 1400 °C. Teploměrné vosky a křídly při dosažení určité teploty mění pevné skupenství na kapalné, popřípadě změní i svou původní barvu. Nanášejí se taktéž na ohřátý povrch a dodávají se v sadách pro určitý rozsah teplot. [27]



## 6. Rozbor experimentu

Experiment probíhal na dvou druzích materiálu popsanych v kapitole 6.3. První část experimentu proběhla na litinových trubkách kde každý polotovaz vystačil na 3 řezy. Vzhledem k vysoké trvanlivosti VBD byl experiment na litině 25P přerušen. Druhá část experimentu proběhla na oceli 13MoCrV6, kde docházelo k žádoucímu rychlému opotřebování břitů.



Obr. 6.1 Struktura experimentu

Dále jsou popsány podmínky experimentu, zařízení použitá pro měření a soustava SNOP.

## 6.1. Stroj

Experiment byl proveden na univerzálním hrotovém soustruhu MAŠTROIJ TROJAN C11 MV (obr. 6.2).



*Obr. 6.2 Použitý obráběcí stroj*

### **Pracovní rozsah stroje:**

Vzdálenost hrotů	1100 mm
Oběžný průměr nad ložem	500 mm
Oběžný průměr nad suportem	290 mm
Průměr sklíčidla	Ø250/315 mm
Zdvih příčného suportu	270 mm
Zdvih podélného suportu	950 mm
Výkon hlavního motoru S1	15kW

## 6.2. Nástroj

### 6.2.1. Vyměnitelná břitová destička od firmy Kyocera - KS 6000

Při experimentu byly použity VBD z řezné keramiky typu KS6000 s nanesenou odporovou vrstvou (obr. 6.3). Složení odporové vrstvy a způsob jejího nanesení je **know-how** firmy Kyocera. Ze vzhledu naneseného povlaku lze usoudit, že povlakovacím materiálem byl TiN.



Obr. 6.3 Použitá VBD

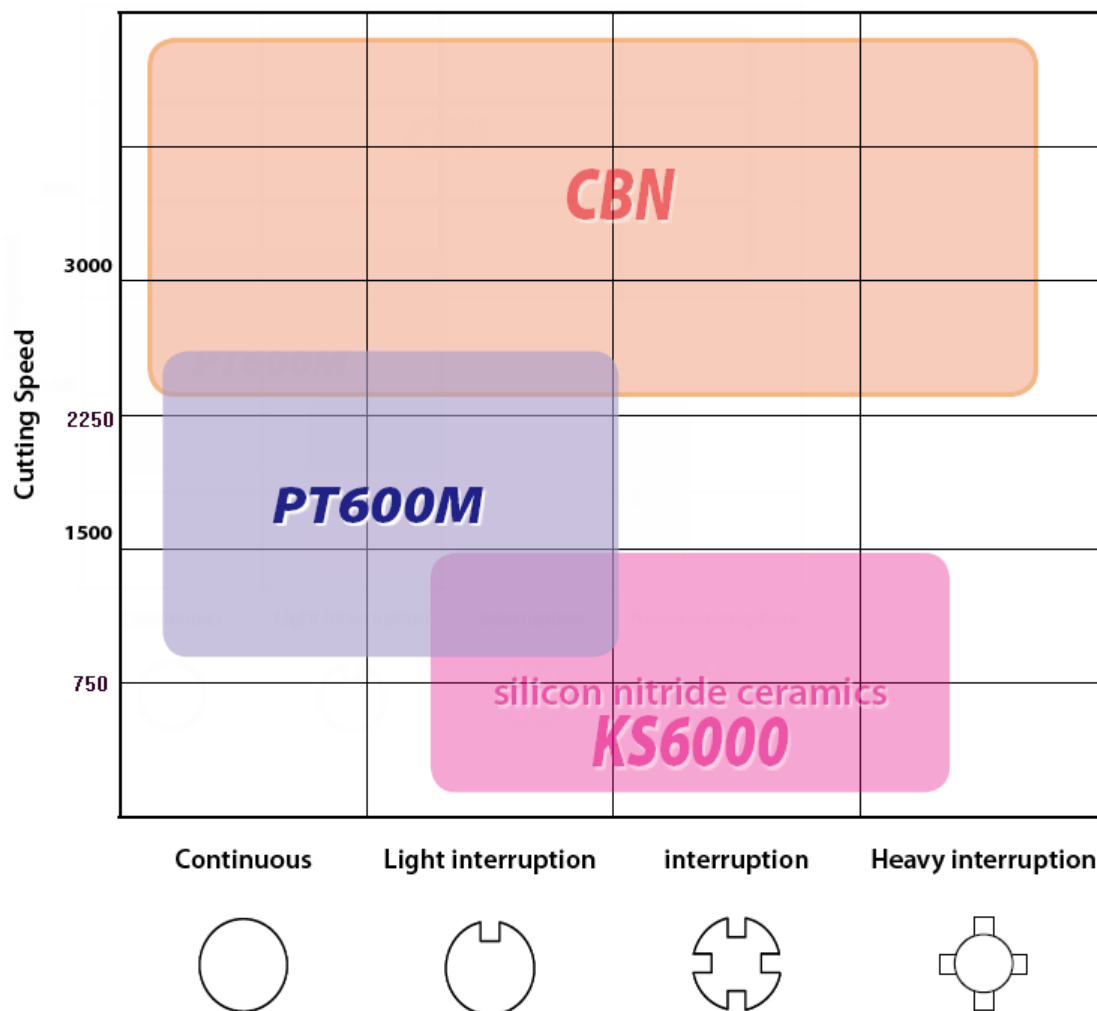
**KS6000** - křemíko-nitridická keramika pro obrábění litin, „s“ nebo „bez“ chlazení, pro zařazení materiálu dle ISO do skupiny K, jak je patrné dle tabulky tab. 6.1.

Tab. 6.1 Aplikace dle výrobce[7]

Workpiece Material	Cast Iron (Gray Cast Iron/Ductile Cast Iron)			
Cutting Range	Finishing	←————→		Roughing
Classification	K01	K10	K20	K30
Ceramic	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px 10px; display: inline-block;">A65</div>  <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px 10px; display: inline-block; background-color: #f08080;">A66N</div>  <div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 2px 10px; display: inline-block; background-color: #f08080;">KS6000</div> </div>			

Nitridová keramika (na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) - vyniká velmi vysokou houževnatostí při zachování vysoké tvrdosti a umožňuje obrábění běžným přerušovaným řezem i použití procesní kapaliny. Tento druh keramiky je zvláště vhodný pro obrábění všech druhů litin, včetně litiny s kůrou. Je také nejvhodnější pro frézování (hrubování) k dosažení maximálních řezných výkonů.[10]

Doporučené řezné podmínky a oblast použití dle výrobce řezného nástroje (obr. 6.4). Při celém experimentu probíhalo soustružení součásti plynulým, nepřerušovaným řezem. A to z důvodů snímání teploty pyrometrem, což by bylo při přerušovaném řezu problematické.


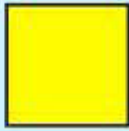


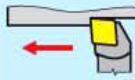
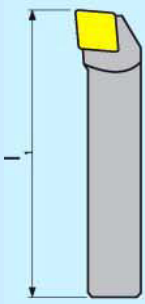
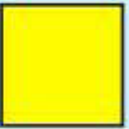




Obr. 6.4 Doporučený pracovní rozsah nástrojového materiálu

### 6.2.2. Držák - XCSRNR2525M-1207SEN

Při experimentu byl využit speciální držák pro vedení elektrického signálu tělem nože s upínáním VBD čtvercového tvaru (tab. 6.2). Úhel nastavení hlavního ostří po vložení VBD je  $\kappa_r = 75^\circ$ . Úhel hřbetu VBD  $\alpha_n = 0^\circ$ . Nožový držák pravý s průřezem 25x25 mm délky 150mm pro čtvercové VBD o délce hrany 12mm a tloušťkou 7mm. Po upnutí VBD je nástrojový úhel hřbetu  $\alpha_n = 20^\circ$ . VBD je v negativním provedení.

Tab. 6.2 Identifikace držáku XCSRNR2525M-1207SEN.

Druh držáku	Způsob upínání	Tvar destičky	Tvar nože	Úhel hřbetu
X speciální	C 	S 	R  75°	N $\alpha_n=0^\circ$ 
Směr řezu	Výška držáku	Šířka držáku	Delka držáku	-
R 	25	25	M 150 	-
Velikost hrany	Tloušťka destičky	Tvar destičky	Úhel hřbetu	provedení
12	7	S 	E  20°	N 

### 6.3. Materiál obrobku

Experiment probíhal na dvou typech materiálů, které jsou používány v největším objemu produkce ve strojírenských podnicích, a to je litina a ocel.

#### 6.3.1. Materiál A - Litina 25P

Materiál A je litina 25P, jejíž struktura je tvořena perlitem (s malým množstvím feritu) s lupínkovým grafitem. Polotovaru byla obrobena před měřením kůra odlitku, aby nedocházelo k ovlivňování experimentu.

Tab. 6.3 Chemické složení materiálu 25P

<i>C [%]</i>	<i>Si [%]</i>	<i>Mn [%]</i>	<i>P [%]</i>	<i>S [%]</i>	<i>Ti[%]</i>	<i>Cu [%]</i>
2,8 ÷ 3,3	1,8 ÷ 2,5	0,6 ÷ 0,8	0,5 ÷ 0,8	< 0,1	0,03 ÷ 0,10	≤0,8

Tab. 6.4 Mechanické vlastnosti materiálu 25P

<i>Mez pevnosti Rm [MPa]</i>	min 250
<i>Tvrdość HB max</i>	230-270
<i>Modul pružnosti E [GPa]</i>	125,9

Polotovár tvořila trubka o vnějším průměru  $\varnothing D = 83$  mm, tloušťce stěny  $t = 6$  mm a délce  $l = 130$  mm (viz. obr. 6.5). Tento materiál se používá jako vložky do motorů automobilů.



Obr. 6.5 Polotovár materiálu A

### 6.3.2. Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6)

Jde o ocel se zvláštními vlastnostmi, pro práci za vyšších teplot, žárovečná pro namáhání při zvýšených teplotách v oblasti meze kluzu i meze tečení. Používá se také pro součásti energetických a chemických zařízení, pracujících při teplotách do 580 °C

Tab. 6.5 Mechanické vlastnosti oceli 15 128 (13MoCrV6)

<i>Mez pevnosti Rm [MPa]</i>	294
<i>Tvrdość HB max</i>	135-183
<i>Modul pružnosti E [GPa]</i>	214

Tab. 6.6 Chemické složení oceli 15 128 (13MoCrV6)

<i>C</i> [%]	<i>Mo</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>V</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Al</i> [%]
0,1 – 0,18	0,4-0,6	0,45-0,7	0,15 - 0,4	do 0,04	do 0,04	0,22-0,35	0,050	0,025

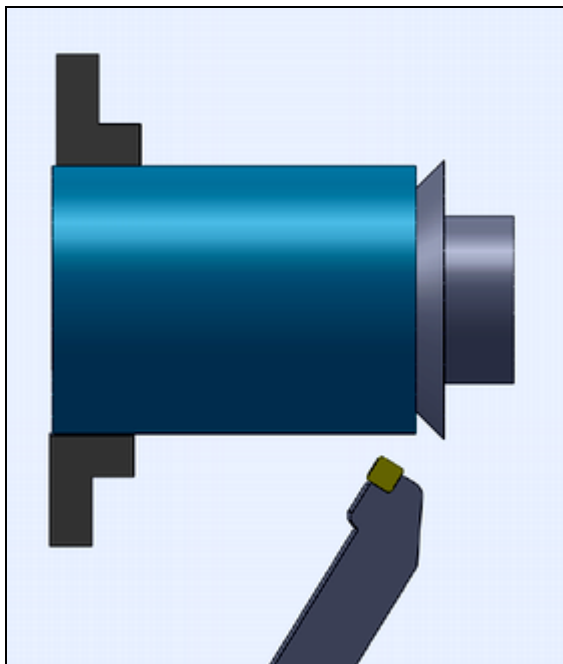
Polotovár tvořila tyč o vnějším průměru  $\varnothing D = 111$  mm a délce  $l = 1130$  mm (viz.Obr. 6.6).



Obr. 6.6 Polotovár materiálu B

#### 6.4. Upnutí

Součást byla upnuta v tříčelistovém sklíčidle a podepřena otočným talířovým hrotem u materiálu A a otočným kuželovým hrotem při upnutí materiálu B. U materiálu A, jak je vidět na obr. 6.7, bylo nutné vytočit nožové saně s upnutým nožovým držákem, aby při začátku obrábění nedošlo k poškození hrotu koníku nebo držáku nástroje. Tímto pootočením nožového držáku došlo ke změně pracovní geometrie VBD.



*Obr. 6.7 schéma upnutí polotovaru A*

Úhel nastavení hlavního ostří tedy byl pro materiál A  $\kappa_r = 55^\circ$ . Ustavení při experimentu pro materiál B již odpovídá označení držáku (str. 59).

## 6.5. Měřicí zařízení použité při experimentu

### 6.5.1. Měření teploty

Pro měření teploty byl použit infrapyrometr MAURER – KTR 1085- 1 (obr. 6.8), jehož specifikace je níže, a to včetně pro experiment nejdůležitějších hodnot, což jsou zaostřovací parametry optiky viz. obr. 6.9. Na obr. 6.10 lze vidět ukázkou z experimentu.

#### Infrapyrometr MAURER - KTR 1085-1

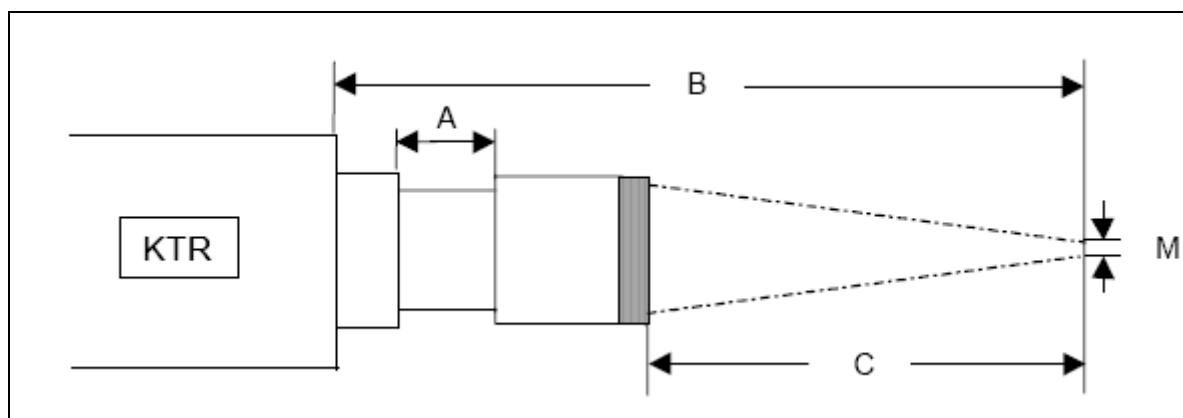


*Obr. 6.8 Infrapyrometr MAUER - KTR 1085-1 [8]*



**Technická specifikace [8]:**

Typ přístroje	KTRD 1085-1.
Charakteristika zaměřovače:	zaměřující infračervený paprsek.
Rozsah měřených teplot:	MR1: 550 - 1800°C (1022 - 3272°F).
Spektrální rozsah:	0,85 - 1,1 $\mu\text{m}$ .
Čas odezvy:	<10 ms.
Nepřesnost měření:	0,5 % z měřené hodnoty v $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ( $\epsilon=1$ , $T_u=23^{\circ}\text{C}$ , $T_{95} = 1\text{s}$ ).
Reprodukovatelnost:	0,1 % z měřené hodnoty v $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ( $\epsilon=1$ , $T_u=23^{\circ}\text{C}$ , $T_{95} = 1\text{s}$ ).
Emisní factor $\epsilon$ :	100 - 10 % nastavitelné u jednotky nebo přes rozhraní.
Analogový výstup:	0 - 20 mA nebo 4 - 20 mA, zátěž max. 500R.
Rozlišení:	<0,1% analogový výstup, <0,1°C na rozhraní.
Výstupní mez:	24 V DC / max. 100 mA.
Rozhraní:	RS 232 $\pm$ 50 V izolované.
Objektiv:	pro adaptaci k měřeným aplikacím je k dispozici rozšířená volba objektivů.
Pracovní teplota:	pyrometr 0 - 50°C (32 - 122°F), optický systém do 150°C (302°F).
Skladovací teplota:	-10°C - +70°C (14 - 158°F).
Teplotní citlivost:	0,05 % / $^{\circ}\text{C}$ .
Vlhkostní tolerance:	35 - 85 % relativní vlhkosti (bez kondenzace).
Pracovní napětí:	24 V DC $\pm$ 10 % or 18 V AC $\pm$ 10 % < 160 mA.
Propojení jednotky:	12-pin konektor.
Rozměry V / Š / D:	54 x 54 x 147 mm (2,13 x 2,13 x 5,79 inch) / ALU-obal.
Hmotnost:	0,6 kg (1,32 lbs).

*Obr. 6.9 Zaostřovací parametry optiky [8]*

Ohnisková vzdálenost	$C = 229 \text{ mm.}$
Optické prodloužení	$A = 13 \text{ mm.}$
Rozměr cíle	$M = 1,5 \text{ mm.}$
Měřicí vzdálenost mezi krytem a cílem	$B = 285 \text{ mm.}$
Měřicí optika	bezbarvá f 60 ø22,4.



*Obr. 6.10 Ukázka měření s infrapyrometrem MAURER - KTR 1085-1*

Pro záznam měřených hodnot byl použit ALMEMO konektor ZA9601FS pro rozsah  $\pm 32 \text{ mA}$  s využitím datalogeru ALMEMO 2590-4S se záznamem v  $^{\circ}\text{C}$ .

**Termokamera Flir E45 (obr. 6.11)**

Termokamery řady E jsou jedny z dnešních nejmenších termokamer a jsou navrženy pro jednoduché osobní používání. Jsou napájeny Li-Ion baterií, což jim zajišťuje až 2 hodinový provoz. [9]

Parametry [9]:

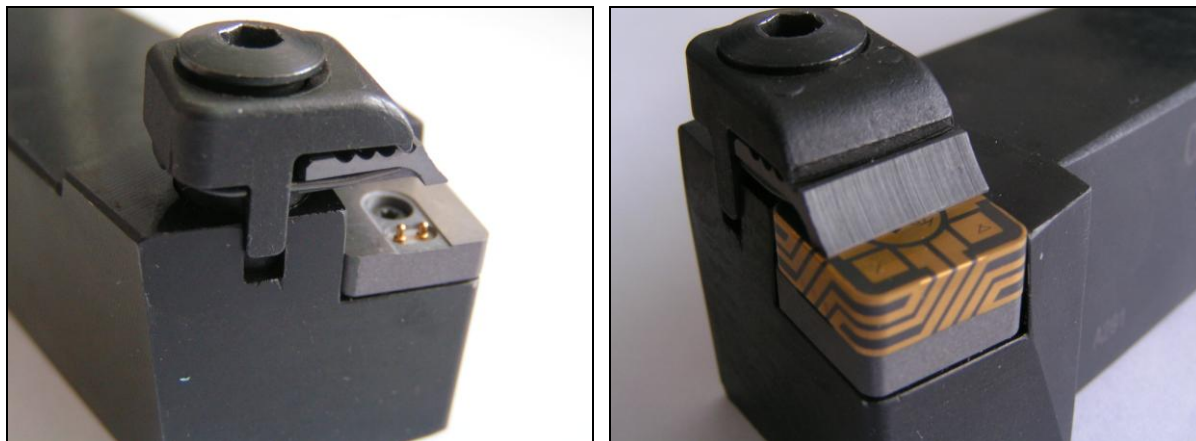
Rozměry l/š/v	265/80/105.
Hmotnost	700 g.
Formát souboru	JPEG.
Spektrální rozmezí	7,5 - 13 $\mu\text{m}$ .
Typ záznamu	zabudovaná flash paměť.
Korekce emisivity	0,1 - 1,0.
Obrazovka	2.5", barevný LCD displej.



*Obr. 6.11 Termokamera FLIR E45[9]*

**6.5.2. Měření elektrického odporu**

Zjišťování opotřebení pomocí odporové vrstvy patří mezi přímé metody. Odporová vrstva nanesená na nevodivém materiálu (keramika) tvoří elektrický obvod, jehož odpor je zaznamenáván. V závislosti na velikosti změny elektrického odporu pak může být usuzováno na velikost opotřebení. Ukázka nožového držáku - obr. 6.12.



*Obr. 6.12 Nožový držák s kontakty na přenos elektrického signálu.*

Odporová vrstva je navržena tak, aby elektrický obvod tvořil právě jen jeden břit a na VBD bylo možné použít všech 8 břitů bez vzájemného ovlivnění (obr. 6.13).



*Obr. 6.13 Řezné destičky s nanesenou odporovou vrstvou*

Pro snímání el. odporu byl použit ALMEMO konektor ZA9003FS pro měření elektrického odporu v rozsahu 0-500 [ $\Omega$ ].

### **6.5.3. Záznamové zařízení**

Signál z měřicích zařízení je zpracováván datalogerem ALMEMO 2590-4S viz. obr. 6.14, který umožňuje zaznamenávání až čtyř nezávislých veličin. Dataloger ALMEMO 2590 slouží jako A/D převodník. Měřené veličiny jsou v již digitální podobě ukládány buď na paměťovou kartu nebo v počítači.



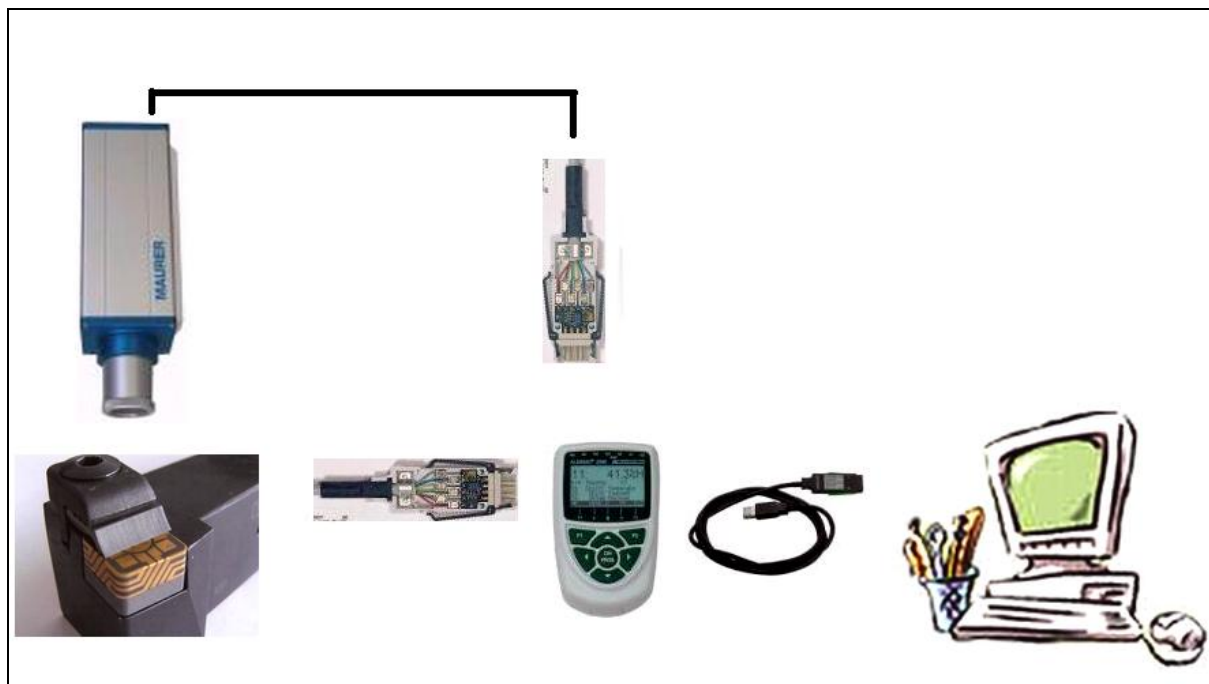
*Obr. 6.14 Dataloger ALMEMO 2590-4S*

Typický příklad záznamu z měření pomocí počítače lze vidět na obr. 6.15 pomocí software ALMEMO AMR-Control Version 5.13, který je možné ukládat do souborů s příponou .txt. Tento soubor je pak možné využít jako zdrojový soubor pro vložení dat do matematického programu pro grafické a statistické zpracování výsledků. Při zpracování této disertační práce byl využit v současnosti nejčastěji využívaný matematický program od firmy Microsoft - Excel.

11:05:32.20	00: +038.81 $\Omega$ Ohm
	01: +0549.8 $^{\circ}\text{C}$ mA
11:05:32.50	00: +038.78 $\Omega$ Ohm
	01: +0549.8 $^{\circ}\text{C}$ mA
11:05:32.80	00: +038.79 $\Omega$ Ohm
	01: +0549.8 $^{\circ}\text{C}$ mA
11:05:33.10	00: +038.81 $\Omega$ Ohm
	01: +0549.8 $^{\circ}\text{C}$ mA
11:05:33.40	00: +038.81 $\Omega$ Ohm
	01: +0549.8 $^{\circ}\text{C}$ mA

*Obr. 6.15 Ukázka záznamu z měření.*

Při experimentu byly současně zaznamenávány hodnoty teploty infrapyrometrem Maurer a i elektrický odpor odporové vrstvy na břitu VBD. Dataloger ALMEMO 2590 hodnoty těchto veličin zaznamenával po 30 setinách sekundy. Schéma zapojení při experimentu viz. obr. 6.16.



*Obr. 6.16 Schéma zapojení měřícího zařízení*

#### **6.5.4. Měření opotřebení**

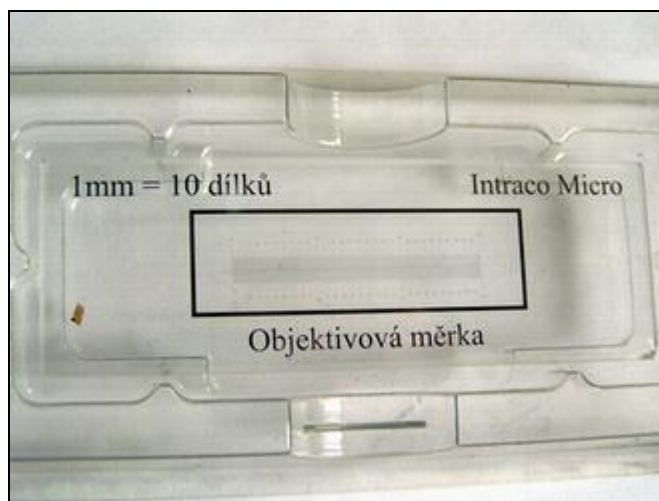
K měření opotřebení byla použita mikrometrická metoda měření za využití dílenského mikroskopu viz. obr. 6.17, tento mikroskop postačuje na měření opotřebení. Optika umožňuje až pětinasobné zvětšení. Díky digitální kameře je možné takto zvětšený obraz uložit do počítače. V průběhu experimentu došlo k upgrade digitální kamery, kdy původní černobílá kamera byla nahrazena barevnou.



*Obr. 6.17 Dílenský mikroskop*



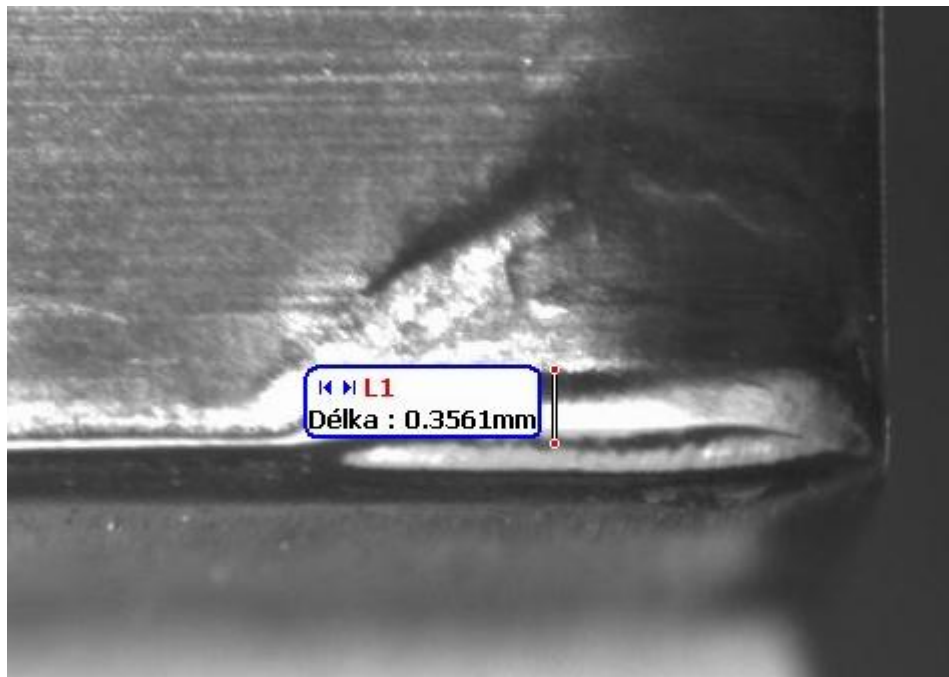
K měření opotřebení pomocí dílenských mikroskopů je potřeba kalibrační měrka obr. 6.18. Tato měrka se vyfotí při stejném zvětšení a ve stejné vzdálenosti jako měřená VBD.



*Obr. 6.18 Objektivová měrka*

Měřicí software pak provede kalibraci vzdálenosti z kalibrační destičky na pixely fotky a díky tomuto je schopen pak již kótovat měřené rozměry ve skutečné velikosti na dalších fotkách. Dobré měřicí softwary jsou schopny uložení si více kalibrací pro různé zvětšení dílenského mikroskopu.

Při experimentu byl využit měřicí software MotiC Image Plus 2. Ukázka kóty je na obr. 6.19.



*Obr. 6.19 Ukázka z měření*

## 7. Diskuze a dosažené výsledky

Záznam měřených hodnot je uveden pro svou rozsáhlost na příloženém CD, v této kapitole jsou uvedena již zpracovaná data a diskuze k nim. Na materiálu A (litina 25P) se nepodařilo dosáhnout opotřebení destičky až do přerušení kontaktu z důvodů nepřiměřeně velké trvanlivosti nástrojového materiálu za daných podmínek. V rámci experimentu bylo spotřebováno 26 litinových trubek (specifikace viz. str.61), na kterých proběhly 3 řezy, nástroj urazil 7,8 m a byl 19 min v řezu za maximálních otáček nastavitelných na stroji ( $n=2000\text{min}^{-1}$ ) a stále nedosáhl kritéria opotřebení. Z průběhu experimentu lze doporučit využití nitridické keramiky pro materiál polotovaru typ A. Další experimenty na litinových materiálech byly z důvodů časové náročnosti vyloučeny. Na materiálu B (ocel 13MoCrV6) proběhlo několik zkoušek při různých řezných parametrech viz Tab. 7.1. Díky velmi rychlému opotřebování břitů nástroje na materiálu B bylo možné břitů VBD testovat až po dosažení kritéria opotřebení.

### 7.1. Řezné podmínky

V první části experiment proběhl na materiálu A. Vzhledem k typu polotovaru, což je tenkostěnná trubka, byly na každé trubce vykonány tři řezy. Volba řezné rychlosti byla omezena technickými parametry stroje. Vzhledem k tématu disertační práce, která se týká metodiky sledování opotřebení, nemusí volené řezné podmínky splňovat hodnoty obvyklé pro tento typ řezného materiálu.

Při pokračování experimentu na materiálu B, což byla ocel, docházelo k velmi rychlému opotřebování, což pro účely experimentu bylo žádoucí. Pro využití v technické praxi však dokazuje nevhodnost nasazení nitridické keramiky pro materiál B. Díky velkým rozměrům polotovaru také nebylo možné nastavovat vyšší řezné rychlosti kvůli bezpečnosti obsluhy, stroj se rozechvěl při pokusech o dosažení větších řezných rychlostí.



Tab. 7.1 Tabulka řezných podmínek

materiál	otáčky stroje	posuv na otáčku	hloubka řezu $a_p$	řezná rychlost
	$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{mm}]$	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
Materiál A řez č.1	2000	0,2	1,5	522
Materiál A řez č.2	2000	0,2	1,5	502
Materiál A řez č.3	2000	0,2	1,5	483
Materiál B břit 1	1000	0,2	1,5	348
Materiál B břit 2	800	0,2	1,5	280
Materiál B břit 3	630	0,2	1,5	219
Materiál B břit 4	800	0,1	1,5	270
Materiál B břit 5	630	0,1	1,5	209
Materiál B břit 6	1000	0,1	1,5	333

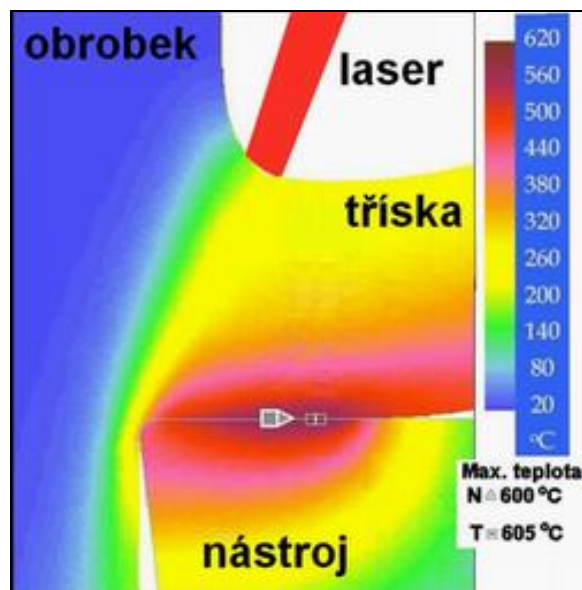
## 7.2. Rozbor průběhu teploty $\theta$

Tato disertační práce je zaměřena na sledování opotřebení pomocí odporových vrstev u řezné keramiky. Elektrický odpor může být ovlivněn působením teploty. Tím vznikla potřeba měřit při experimentu teplotu.

Vzhledem ke speciální úpravě nástrojového držáku, kdy odporová vrstva již tvoří elektrický obvod, se vyloučila možnost měření teploty při experimentu termočlánky a to kvůli ovlivnění měřeného elektrického obvodu. Jako nejlepší se jevílo použití bezkontaktních optických metod.

Pro měření teploty byly použity přístroje viz.kapitola 6.5.1. Oba přístroje použité při experimentu jsou z kategorie bezkontaktního optického měření teplot. Pro nastavení hodnoty emisivity byla využita metoda kalibrace v peci viz kapitola 5.3.1 a je možné si prohlédnout fotku z kalibrace obr. 5.9, hodnota emisivity pak ještě byla kontrolována s tabulkami emisivity příloha č. 2.

Ukázalo se, že využití optických metod pro snímání teploty u materiálů vytvářejících dlouhou třísku je značně problematické. U materiálu tvořícího drobnou třísku tato metoda byla použitelnější.



Obr. 7.1 Teplotní pole [11] s vyznačením snímání teploty.

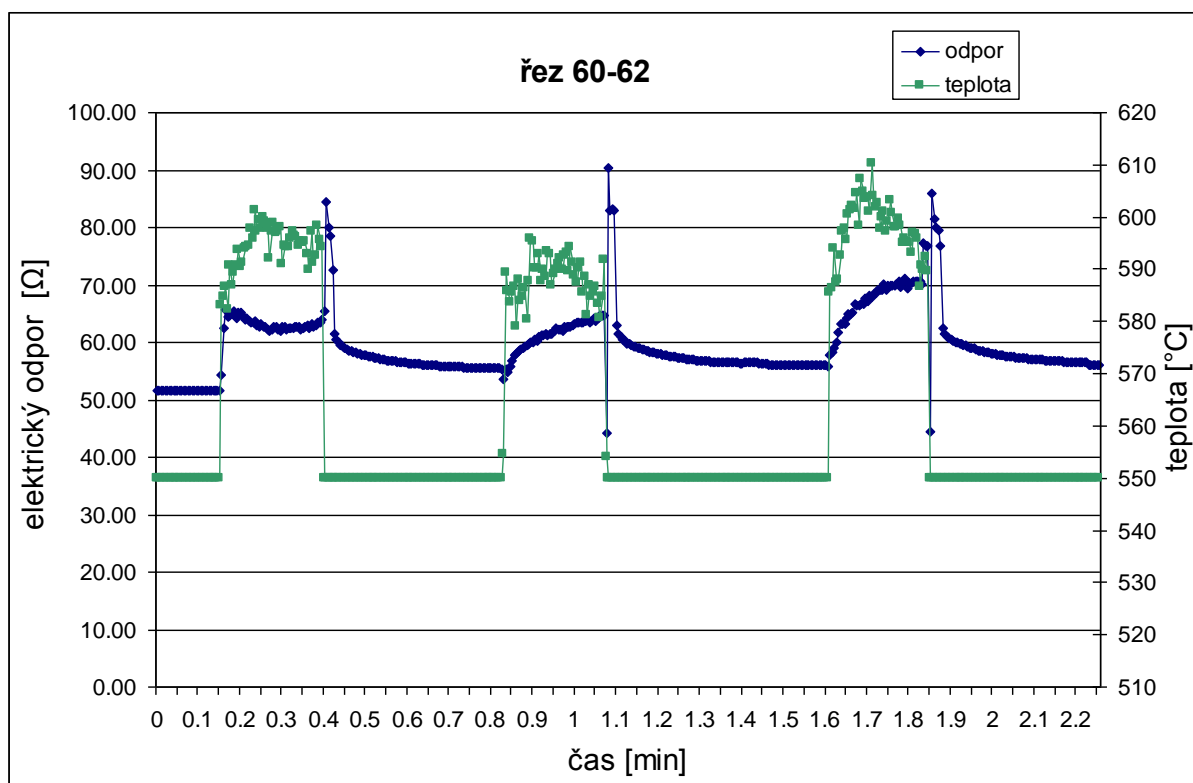
Teplota je snímána laserovým paprskem zaměřeným na břit VBD. V řezu nastává situace, kdy je břit překryt právě odebíraným materiálem, a tudíž je snímána teplota v oblasti střížné roviny viz.obr. 7.1. Při tvorbě elementární třísky není měřící paprsek tolik krytý. I tak je měřená teplota pouze orientační. Disertační práce má za cíl ověření metodiky zjišťování opotřebení nástrojů pomocí odporových vrstev, tudíž teplota je okrajovou záležitostí a zajímáme se o ni pouze z hlediska působení na odporovou vrstvu.

### 7.2.1. Materiál A - Litina 25P

Grafická ukázka typického záznamu z měření na materiálu A viz. obr. 7.2. V grafu je možné vidět dvě měřené veličiny v časové závislosti (teplotu a elektrický odpor). Teplota v grafech je měřená optickým pyrometrem (str.64), jehož výstup můžeme zaznamenávat pomocí datalogeru (str.68).

Průběh teploty znázorňuje v grafu zelená křivka. Křivka začíná na hodnotě, od které začíná měřit optický pyrometr, tj. 550°C. V čase 0,15 min teplota prudce naroste, což značí, že začalo obrábění. Díky pyrometru je proto jasná představa o čase, kdy začíná, ale i končí počátek záběru ostří do materiálu obrobku. Zároveň je možné si udělat představu o čase potřebném pro přejetí do dalšího řezu. V této části experimentu, který probíhal na litinových tenkostěnných trubkách, je záznam z měření nepřerušovaný až do obrobení materiálu na ještě bezpečnou tloušťku stěny trubky, tzn. na jednom polotovaru bylo možné odřezat 3 úběry.

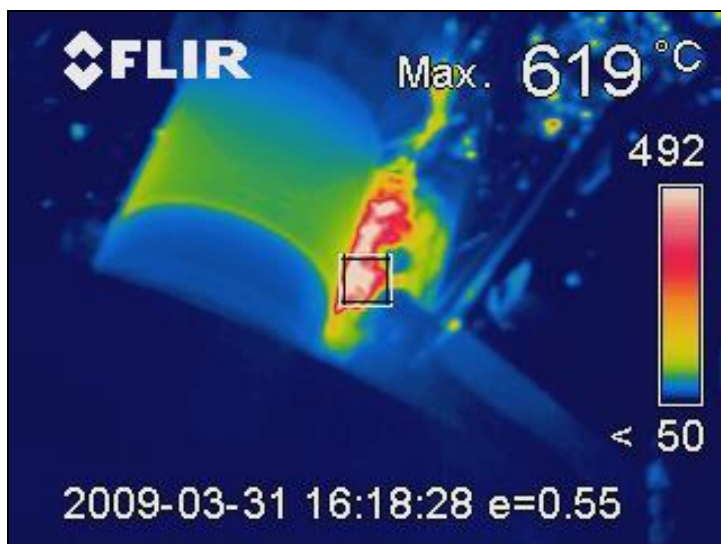
V grafu je výrazně podtržena skutečnost, že experiment probíhal na konvenčním stroji, a tudíž se doba potřebná pro přejezd mezi jednotlivými řezy liší.



Obr. 7.2 Grafické znázornění měření řezu č.60-62

( $v_c=522-483 \text{ m.min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

Po skokové změně, která nastala při začátku obrábění následuje mírný růst teploty a následně mírný pokles v rozmezí přibližně 20°C. Toto může souviset s dosažením tepelné kapacity snímaného povrchu, v tomto případě špičky VBD nebo změnou směru odchodu třísky. Hodnocení důvodů průběhu ponechává tato práce na publikace hodnotící teplo a teplotní pole při obrábění. V této práci nás teplota zajímá pouze z hlediska jejího vlivu na elektrický odpor povlakové vrstvy.

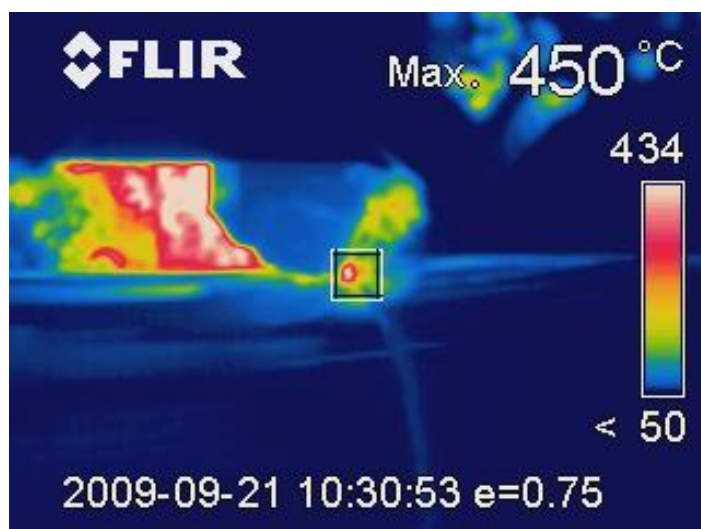


Obr. 7.3 Ukázka z měření termokamerou Flir.

Ukázka záznamu z termokamery Flir obr. 7.3 při obrábění materiálu A. Využití této kamery má značné omezení rychlosti snímkování, tudíž byla použita minimálně.

#### 7.2.2. Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6)

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, z nastíněných důvodů byla teplota při experimentech na materiálu B veličinou, která sice byla měřena, ale nemá přílišnou vypovídající hodnotu viz.obr. 7.1. Díky krytí měřeného bodu třískou často pyrometr nezačal měřit, protože teplota na třísce neměla hodnotu vyšší než 550°C. O teplotě proto mohou vypovědět fotky z termokamery Flir obr. 7.4. I tady je ovšem břit kryt odcházející třískou. Za povšimnutí stojí teplota třísky, která je už mimo řez. Z obrázku lze podle její barvy vyvodit, že její teplota, i když už měla čas se mírně ochladit, je přibližně na stejné úrovni jako teplota v snímaném místě krytém třískou viz obr. 7.1. Což potvrzuje předpoklad, že na břitu nástroje musela být teplota mnohonásobně vyšší.



Obr. 7.4 Snímek termokamerou flir při obrábění materiálu B

Pro porovnání jsou dosažené výsledky na obr. 5.1, kde v rámci DP [23] byla měřena závislost teploty na řezné rychlosti pomocí přirozeného termočlánku. Grafický záznam průběhu teplot měřených pyrometrem viz kapitola 7.4.2, v použitých grafech růžová křivka.

### 7.3. Rozbor průběhu elektrického odporu

Podobně jako u měření teploty je rozdělena tato kapitola na popsání chování odporu odporové vrstvy na materiálu A a B z důvodů jistých odlišností charakteristických pro daný materiál.

#### 7.3.1. Materiál A - Litina 25P

U materiálu A je při začátku řezu patrný odskok měřeného elektrického odporu, jak lze vidět na souhrnném záznamu z měření jednoho polotovaru (obr. 7.2) nebo například v detailu jednoho řezu obr. 7.5. Tyto odskoky nastávají pouze u obrábění materiálu A. Následný průběh elektrického odporu má vzrůstající tendenci, což souvisí s procesem obrábění a zřejmě také s teplotou funkční odporové vrstvy. Na konci obrábění každého řezu materiálu A je patrný výkmit hodnot měřeného elektrického odporu.

Tento výkmit částečně objasňuje rovnice závislosti elektrického odporu na teplotě

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta\theta) \quad (7.2)$$

kde :

R elektrický odpor [ $\Omega$ ],

$\alpha$  teplotní součinitel elektrického odporu [ $K^{-1}$ ],

$\Delta\theta$  teplotní rozdíl [K],

$R_0$  počáteční odpor [ $\Omega$ ].



Obr. 7.5 Grafické znázornění řezu č.58

Pro využití rovnice (7.2) je ovšem třeba znát teplotní součinitel elektrického odporu, který díky neúplné znalosti povlakovacího materiálu nelze určit z fyzikálních tabulek a je nutné ho určit z přidruženého experimentu.

**Stanovení teplotního součinitele elektrického odporu**

Teplotní součinitel elektrického odporu (též teplotní součinitel rezistivity) je fyzikální veličina, vyjadřující závislost elektrického odporu (rezistivity) vodiče (polovodiče) na teplotě.

Odpor elektrických vodičů s rostoucí teplotou stoupá, teplotní součinitel elektrického odporu má kladnou hodnotu.

Symbol veličiny:  $\alpha$  (příp.  $\alpha_R$ ) [ $K^{-1}$ ]

$$\text{Výpočet:} \quad \alpha = \frac{\Delta R}{R_0 \cdot \Delta \theta} \quad (7.3)$$

Kde:

$R_0$  počáteční odpor [ $\Omega$ ],

$\Delta R$  rozdíl odporů při rozdílu teplot  $\Delta \theta$

$\Delta \theta$  rozdíl teplot

Experiment na stanovení teplotního součinitele elektrického odporu proběhl za podmínek, kdy byla špička nástroje zahřívána a kontaktním teploměrem snímána teplota na špičce, zároveň byla na datalogeru odečítána hodnota elektrického odporu. Tento postup byl třikrát zopakován. Zjištěná data byla statisticky zpracována a výsledkem je hodnota součinitele elektrického odporu pro odporovou vrstvu:

$$\alpha = (0,463 \cdot 10^{-3} \pm 0,029 \cdot 10^{-3}) \text{ K}^{-1}$$

Při vyjádření teplotního rozdílu z rovnice 7.2 vznikne rovnice:

$$\Delta \theta = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha} \quad (7.4)$$

a z ní rovnice na výpočet teploty:

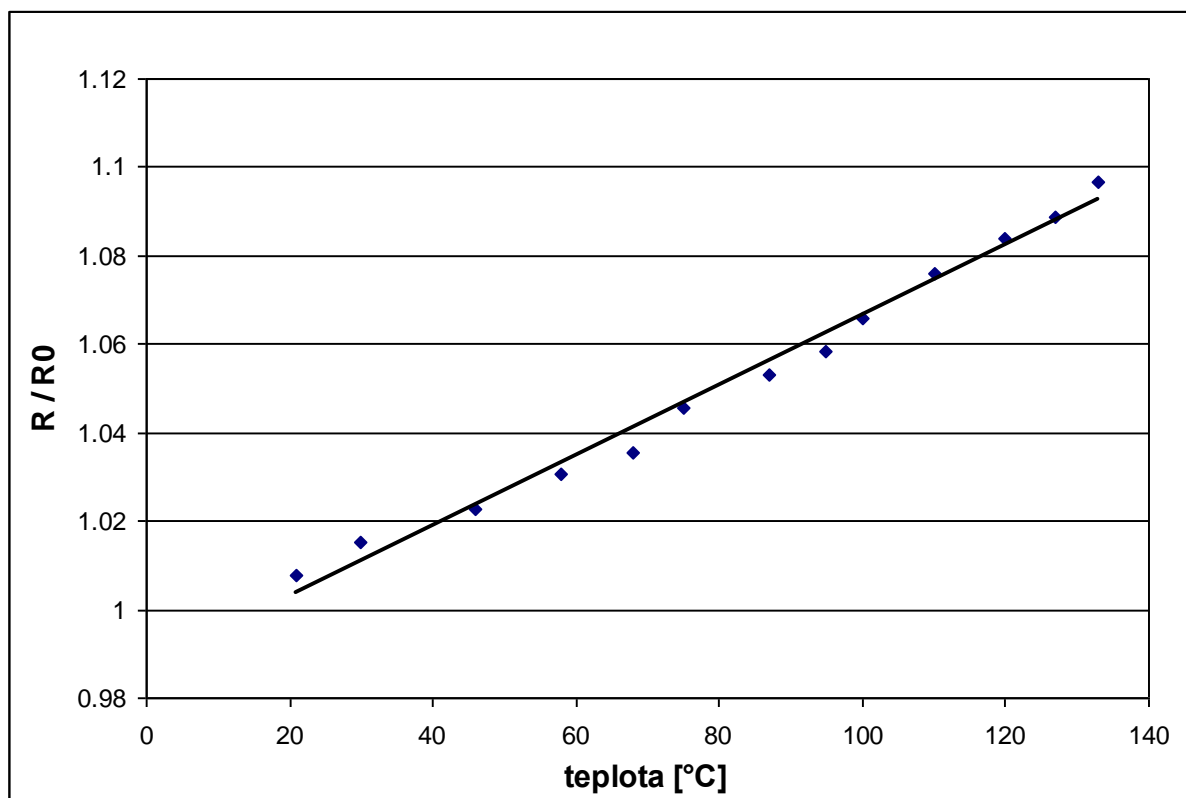
$$\theta = \left( \frac{R - R_0}{R_0 \cdot \alpha} \right) + \theta_0 \quad (7.5)$$

Po dosazení zjištěného součinitele tepelného odporu a hodnot odporu některého řezu např. 58 viz. obr. 7.5 činí vypočtená hodnota:

$$\theta = \left( \frac{63,68 - 82,97}{63,68 \cdot 0,463 \cdot 10^{-3}} \right) + 22 = 675,8 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7.6)$$

Pokud srovnáme hodnotu teploty jak ji naměřil pyrometr, což je  $607^{\circ}\text{C}$ , a hodnotu vypočtenou  $675.8^{\circ}\text{C}$  a pokud zvážíme ovlivnění naměřené teploty odcházející třískou a také zprůměrování teploty v oblasti terče pyrometru, což je kružnice o průměru 1,5 mm, lze vidět mezi těmito teplotami souvislost.

Zvláště pokud je vytvořena charakteristická závislost poměru odporů na teplotě (obr. 7.6) z hodnot získaných při určování teplotního součinitele elektrického odporu a provede se srovnání s obr. 5.8 Charakteristická závislost termistorů na teplotě. Dalo by se uvažovat o možnostech měření teplot pomocí tohoto jevu.



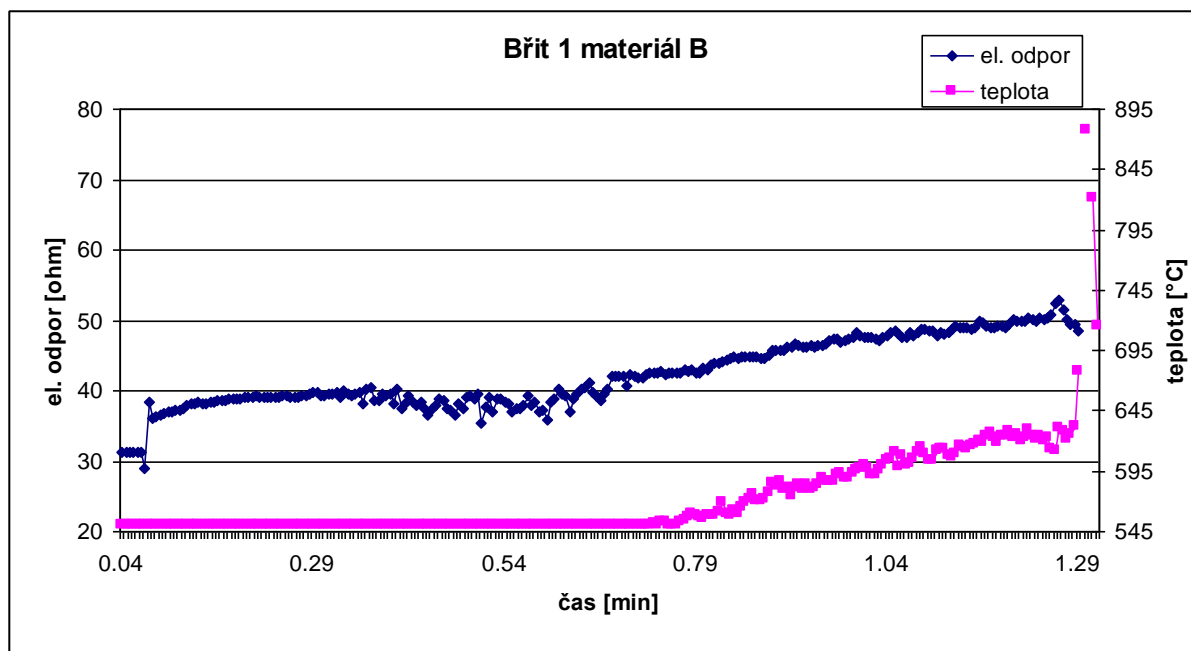
Obr. 7.6 Charakteristika závislosti poměru odporů na teplotě

Dosažená charakteristika je svým lineárním průběhem podobná charakteristice platinového teploměru viz obr. 5.8. Z dosaženého výpočtu se dá usoudit, že odporová vrstva při obrábění materiálu A se chová jako kovový teploměr. Pro potvrzení tohoto předpokladu by bylo potřeba rozsáhlejšího výzkumu zaměřeného na tuto hypotézu.



### 7.3.2. Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6)

Typický průběh elektrického odporu u materiálu B lze vidět na obr. 7.7. Narozdíl od průběhu elektrického odporu při obrábění materiálu A jsou vidět patrné rozdíly. Na první pohled zde nejsou přítomny výrazné výkmity, jak je známe z průběhu elektrického odporu na materiálu A. Největší rozdíl oproti průběhu grafů při materiálu A je však v tom, že na obr. 7.7 je nepřerušovaný záznam od začátku řezu až do dosažení kritéria dovoleného opotřebení nástroje. Proto je širší diskuze s rozбором průběhu vedena u jednotlivých viz kapitola 7.4.2.

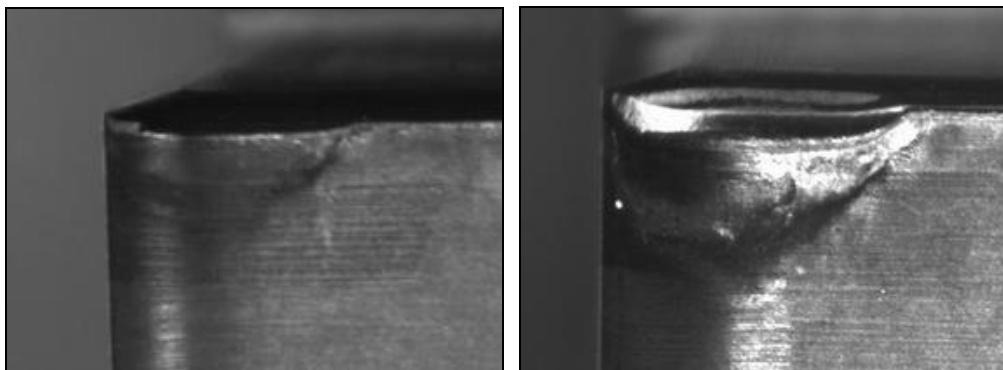


Obr. 7.7 Ggraf záznamu průběhu odporu a teploty na břitu č.1 materiálu B

## 7.4. Rozbor závislosti opotřebení na elektrickém odporu

### 7.4.1. Materiál A- Litina 25P

Na dílenském mikroskopu ze začátku experimentu byla k dispozici pouze černobílá kamera. Na obrázcích viz obr. 7.8 lze vidět oblast naprašování obrobeného materiálu, což mohlo ovlivnit odečítání velikosti opotřebení zvláště pak na ještě černobílých obrázcích. Na obrázku vlevo lze vidět dvanáctý řez, což odpovídá obrobení 1200 mm, je zde patrná začínající oblast naprašovaného materiálu. Při obrábění odpovídajícímu délce 7700 mm je možné vidět na první pohled destruovaný břit s odlomenou částí hřbetní plochy. Při druhém podrobnějším pohledu je zjištěno odlomení materiálu, ne však břitu, ale naprašované vrstvy.



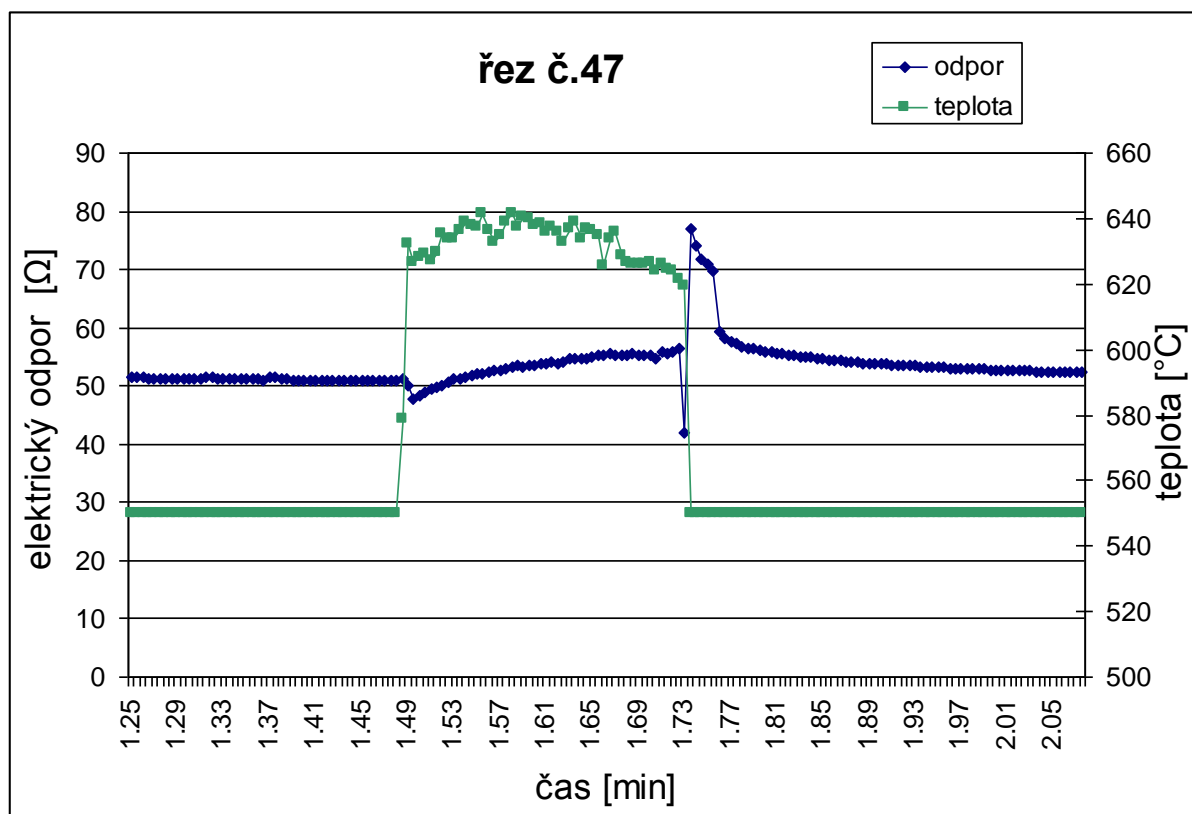
*Obr. 7.8 Řez 12 a řez 77.*

Tato naprášená vrstva vykazuje odolnost proti běžnému otěru. Není však natolik pevná, aby obstála při najetí do obráběného materiálu. V podstatě funguje jako jakýsi hřbetní nárůstek viz. obr. 7.9, ovšem jiných vlastností a též jiných principů tvorby a funkčnosti než nárůstek, jak je znám z teorie obrábění.



*Obr. 7.9 Pohled na břit po 77 řezu s patrným hřbetním nárůstkem*

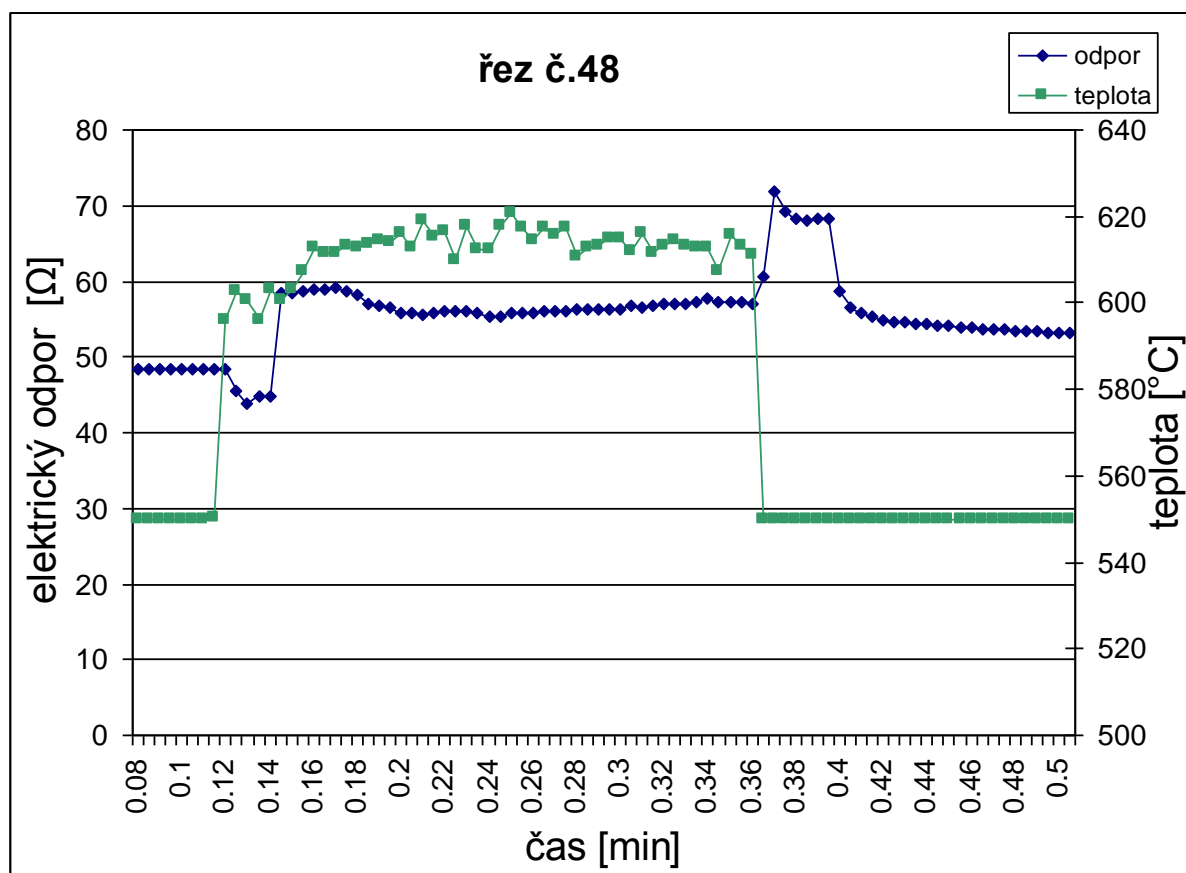
V podstatě tento hřbetní nárůstek neovlivňuje obráběcí proces, ale z hlediska snímání elektrického odporu na VBD vytváří vodivou vrstvu, která zvětšuje průřez obvodu což se projevuje i na hodnotách sledovaného elektrického odporu. Při opětovném pohledu na grafické znázornění některého z řezů materiálu A viz. obr. 7.10 je zřetelná skoková nižší hodnota elektrického odporu, za což může právě naprášení materiálu pod břit nože a vytvoření již zmiňovaného většího průřezu sledovaného obvodu.



Obr. 7.10 Grafické znázornění řezu č.47 ( $v_c=483 \text{ m.min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

Díky současnému působení teplotní změny a zvětšení průřezu vodiče lze těžce odhadnout při počátku každého řezu, jestli převáží nárůst teploty, což má pro elektrický odpor zvětšující účinek, nebo jestli převáží nárůst průřezu, což má pro elektrický odpor zmenšující účinek.

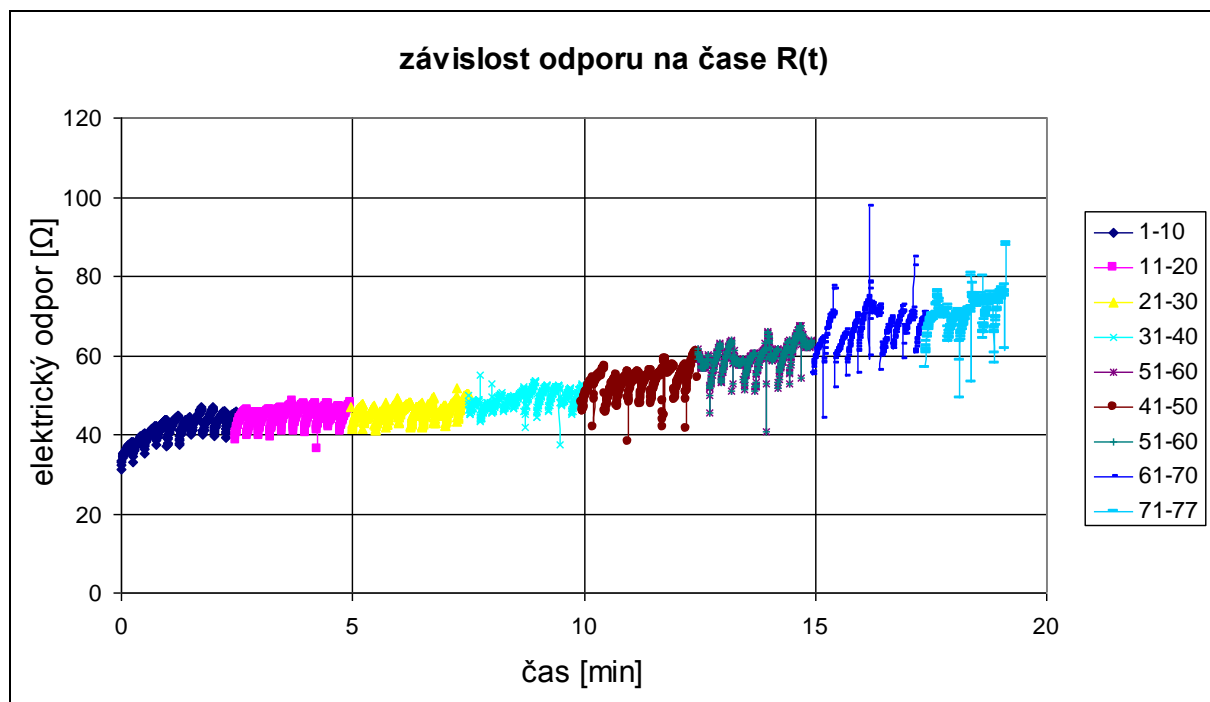
Ovlivnění průběhu větším vlivem teploty lze pozorovat vždy na prvním řezu (ze tří) na polotovaru, kdy pro umožnění nastavení správné hloubky řezu je třeba se letmo dotknout nožem na obvodu polotovaru pro vynulování stupnice, poté poodjet a nastavit hloubku řezu  $a_p$ . V těchto počátečních řezích, kdy dochází k doteku s materiálem, jsou patrné anomálie ve všech prvních řezích viz. ukázka na obr. 7.11.



Obr. 7.11 Grafické znázornění řezu 48 ( $v_c=522\text{m.min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

Tyto anomálie se liší dobou, která uběhla od letmého doteku po počátek obrábění, také hloubkou a dobou doteku tzn. nemají vždy stejný průběh. Ve většině případů však mají charakteristický větší elektrický odpor po začátku řezu, který se v průběhu řezu ustálí do podoby, jakou mají ostatní řezy na materiálu A.

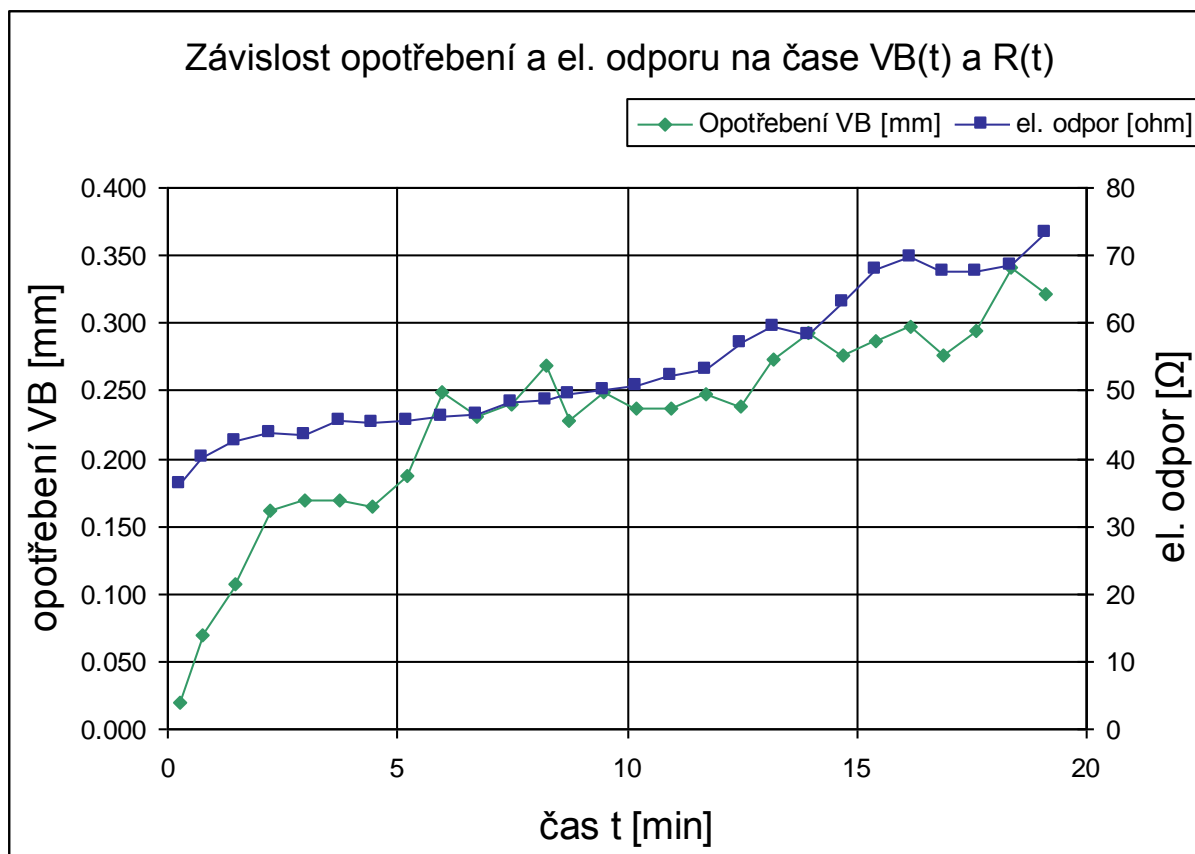
Po skončení řezu nastává situace, kdy suport najede na doraz a nástroj přestává řezat. Elektrický odpor má díky hřbetnímu nárůstu nejnížší hodnotu (zvětší se průřez vodiče). V dalším okamžiku díky mírnému odskoku, kdy je vyrazen strojní posuv, odpadá část naprášeného materiálu a zároveň povrchová vrstva VBD prudce snižuje svoji teplotu, a tudíž má sledovaný elektrický odpor maximální hodnotu, kterou pak již postupně snižuje, jak se teplota VBD ustaluje na teplotě okolního prostředí.



Obr. 7.12 Závislost odporu při jednotlivých řezech na čase  
 $(v_c=522-483 \text{ m.min}^{-1}; f=0,2\text{mm}; a_p=1,5)$

V grafu závislosti elektrického odporu na čase je vidět analogie s grafem závislosti opotřebení VB na čase. Pro větší přehlednost vyjádřením průměrné hodnoty elektrického odporu z každého řezu, u kterého bylo měřeno opotřebení, a vynesení hodnot naměřeného opotřebení pro tyto řezy lze vytvořit závislost opotřebení a elektrického odporu na čase VB(t) a R(t) viz. obr. 7.13.

Průběh závislosti opotřebení na čase odpovídá teoretickému průběhu obr. 4.10. Pokud opomineme menší nárůst elektrického odporu na začátku závislosti, tak průběh elektrického odporu odpovídá teoretickému průběhu opotřebení.



Obr. 7.13 Závislost opotřebení a elektrického odporu na čase VB(t) a R(t)

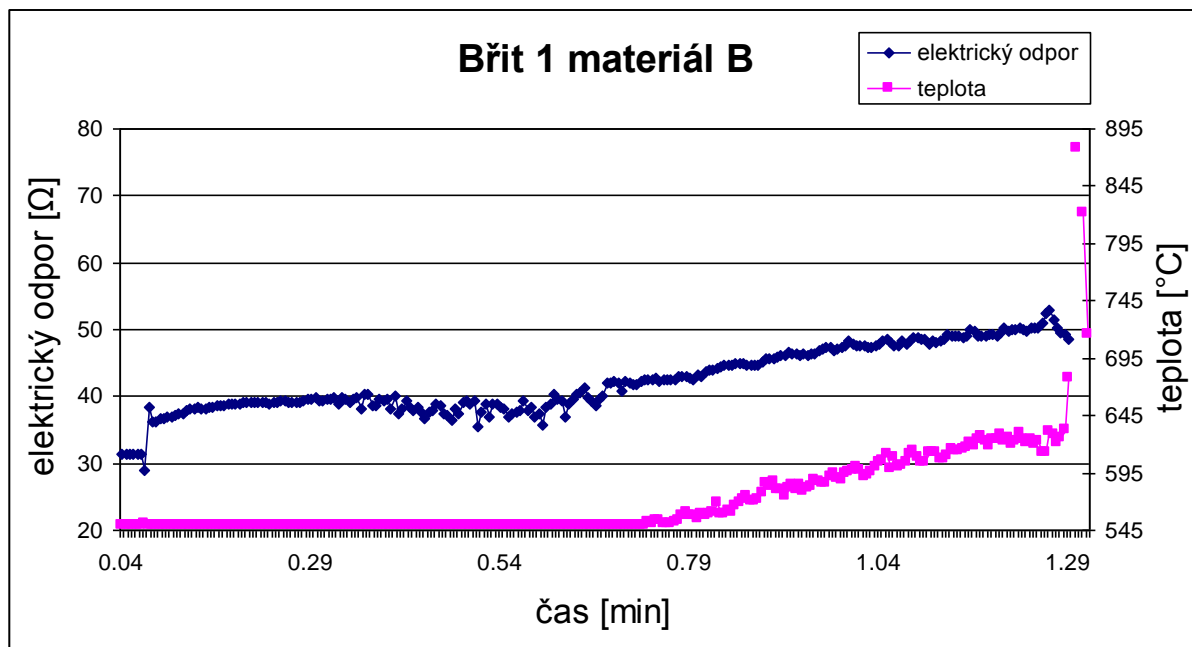
( $v_c=522-483 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

#### 7.4.2. Materiál B - Ocel 15 128 (13MoCrV6)

Při obrábění materiálu B docházelo k rychlému opotřebení břitu nástroje, což bylo v této fázi experimentu žádoucí. Při obrábění materiálu A byla ověřena základní souvislost mezi opotřebením nástroje a změnou elektrického odporu nanosené vrstvy. Vzhledem k nedosažení kritéria opotřebení u materiálu A bylo žádoucí ověření chování elektrického odporu při dosažení kritéria opotřebení.

**Měření na břitě 1**

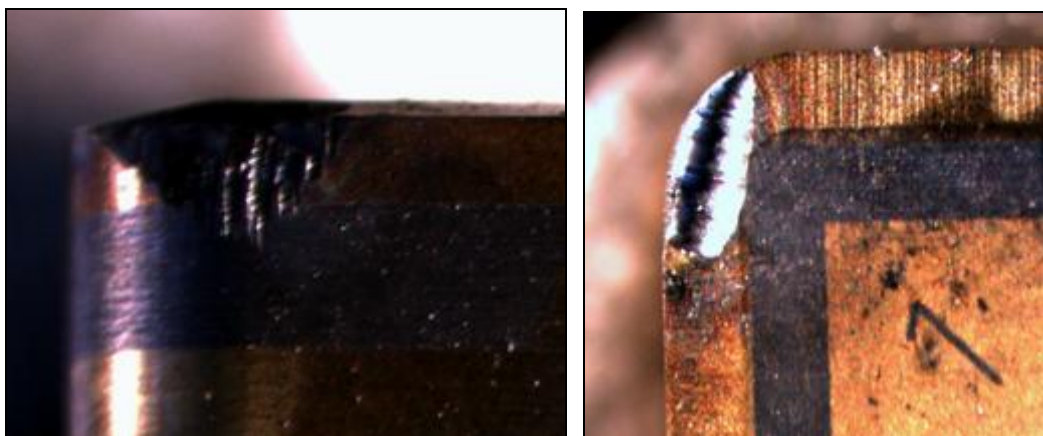
Na obr. 7.14 je vidět záznam z měření na břitě 1, v místě přerušení signálu je dosaženo kritéria opotřebení, jak lze vidět na obr. 7.15.



*Obr. 7.14 Záznam z měření břitu 1 na materiálu B*

*( $v_c=348 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,2 \text{ mm}$ ;  $a_p=1,5$ )*

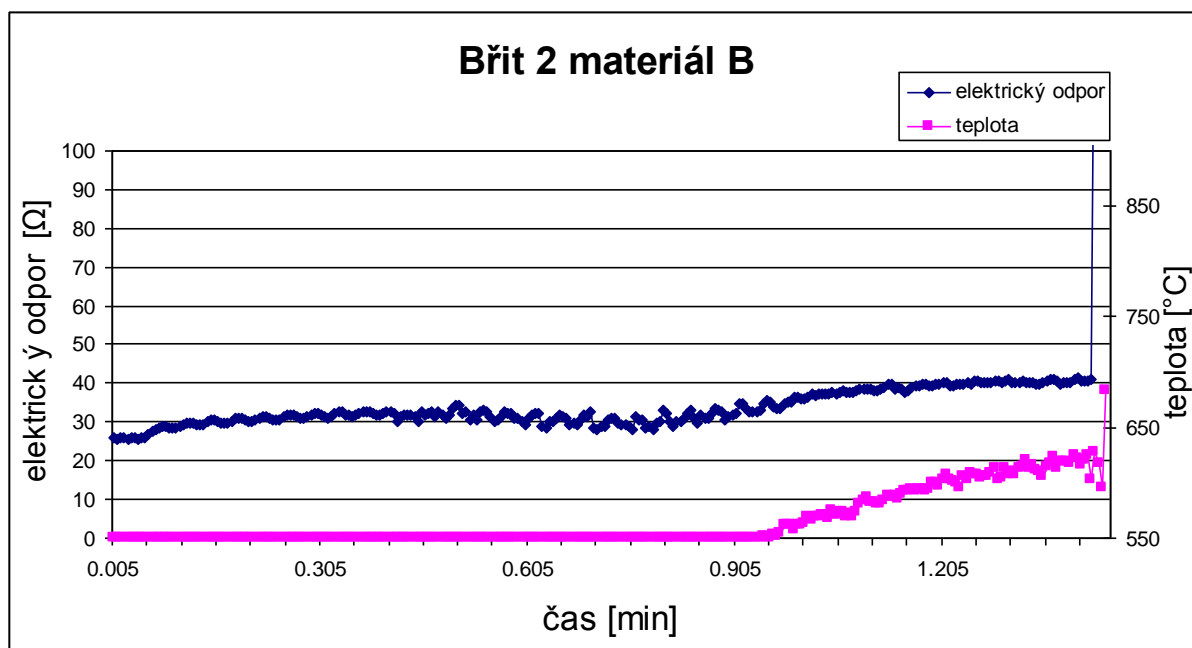
Dle průběhů grafů z testování dalších břitů není patrná nápadná souvislost průběhu elektrického odporu s opotřebením. Dle zjištěných skutečností se lze pouze shodnout na dosažení hodnoty kritéria opotřebení, kdy je elektrický obvod přerušen.



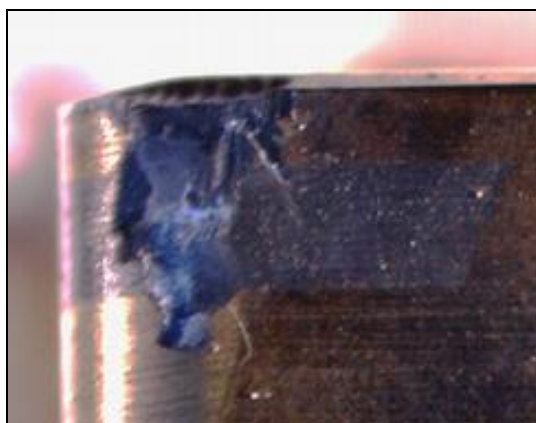
*Obr. 7.15 Fotky opotřebením břitu č.1*

### Měření na břitě 2

V grafickém zpracování naměřených dat získaných při opotřebovávání břitu 2 (obr. 7.16) je patrný klidný průběh elektrického odporu. Z toho lze usuzovat i na mírný nárůst opotřeбенí břitu nástroje. Tento trend by odpovídal i použití nižší řezné rychlosti. Takový průběh by zřejmě pokračoval, ale byl přerušen lomem břitu nástroje obr. 7.16, což se projevilo přerušením el. obvodu.



Obr. 7.16 Záznam z měření břitu 2 na materiálu B ( $v_c=280 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,2 \text{ mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

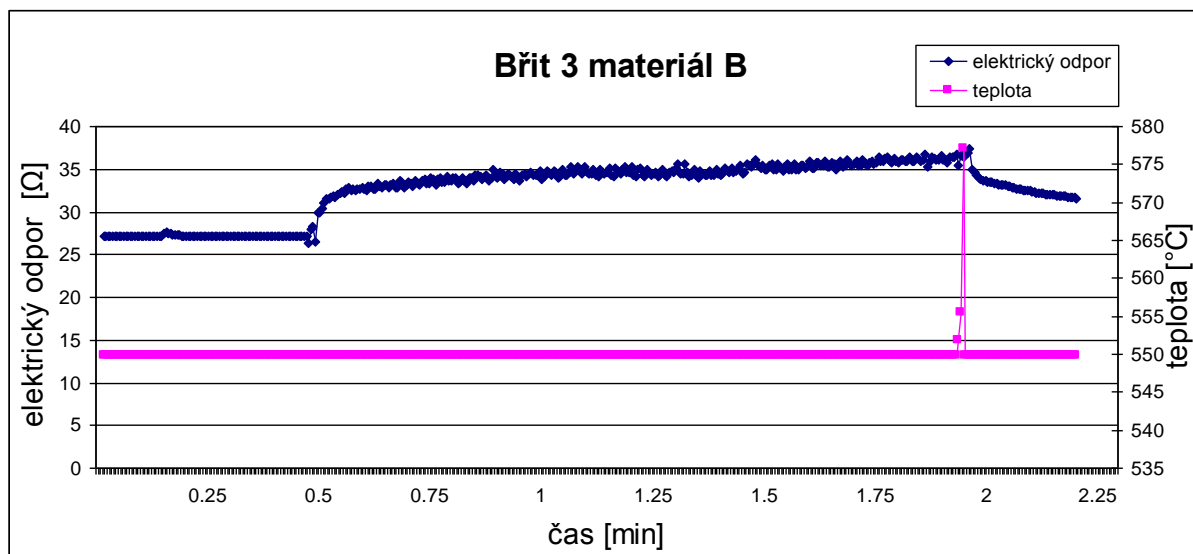


Obr. 7.17 Fotky opotřebení břitu č.2



### Měření na břitu 3

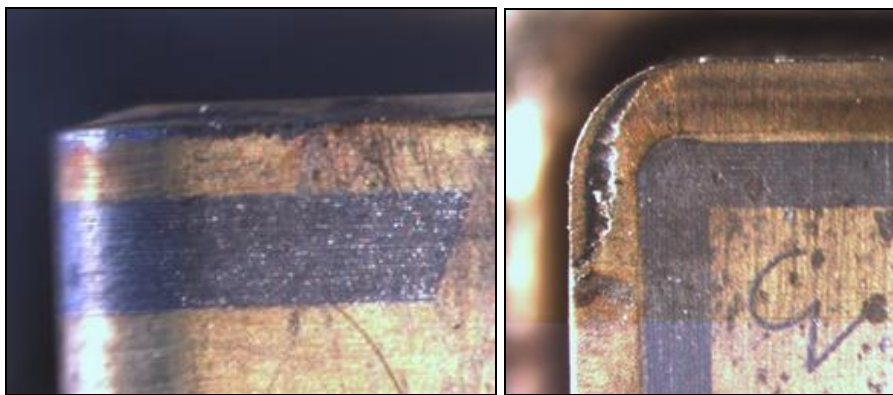
Při obrábění pomocí břitu 3 byl průběh elektrického odporu podobný jako u obrábění břittem 1 a 2. Při přerušení řezu ještě před dosažením kritéria opotřebení viz obr. 7.19 a v grafu obr. 7.18 je zřejmé pokračování elektrického signálu z neúplného přerušení odporové vrstvy. Podobně jako při obrábění materiálu A při nedosažení kritéria opotřebení elektrický odpor po dokončení řezu, díky chládnutí břitu nástroje, klesá.



Obr. 7.18 Záznam z měření břitu 3 na materiálu B

( $v_c=219 \text{ m.min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

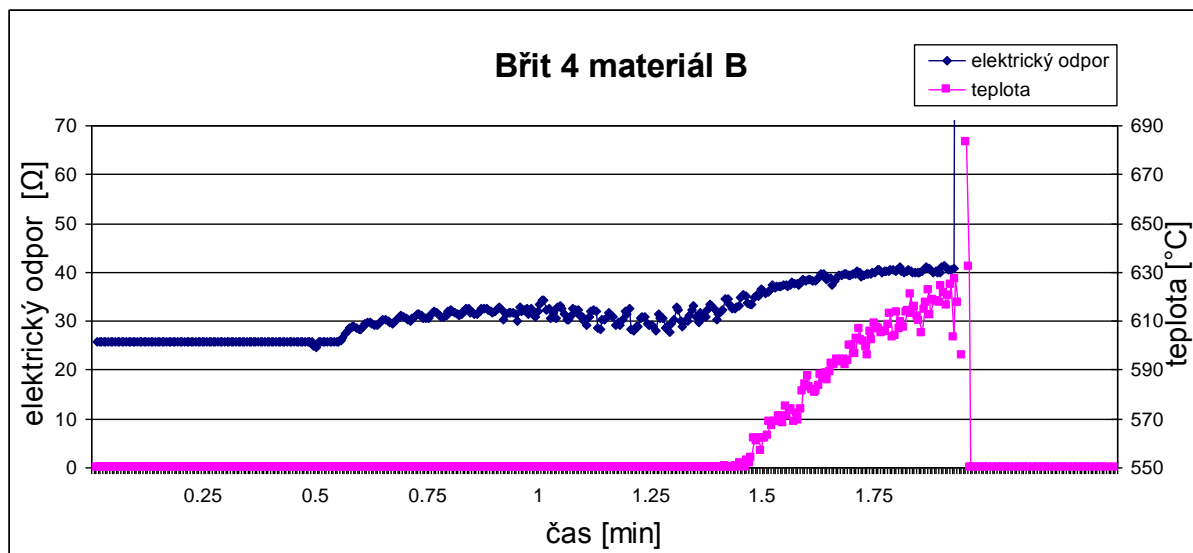
Na obr. 7.19 v levo je vidět minimální opotřebení na hřbetu nástroje a proužek odporové vrstvy, který udává dovolené kritérium opotřebení o velikosti  $VB_{\text{krit}}=0,7 \text{ mm}$ . Na obr. 7.19 vpravo je vidět začínající žlábek na čele nástroje, opotřebení  $KB = 0,15\text{mm}$ .



Obr. 7.19 Fotky opotřebení břitu č.1

### Měření na břitu 4

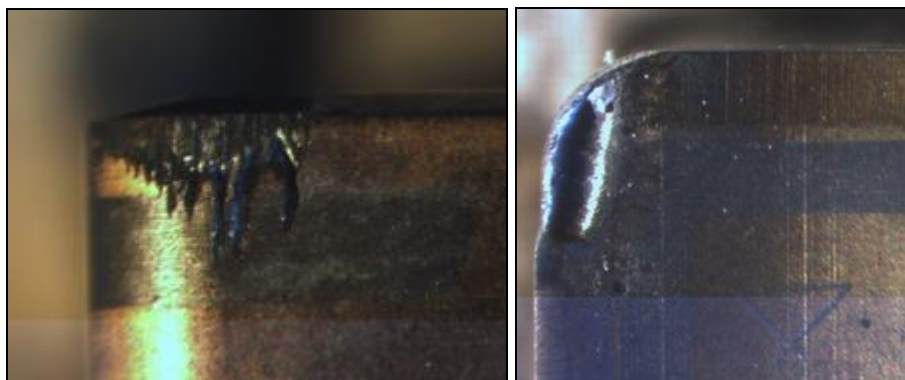
Průběh elektrického odporu u obrábění břitem 4 je téměř shodný s předchozími případy. Opět na začátku řezu je patrný mírný nárůst elektrického odporu a nárůst teploty na třísece až na hodnoty měřitelné pyrometrem. V řezu musely být, jak již bylo uvedeno, teploty mnohonásobně vyšší, a tudíž vznikly podmínky pro difuzní opotřebování nitridické VBD.



Obr. 7.20 Záznam z měření břitu 4 na materiálu B

( $v_c=270 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p=1,5$ )

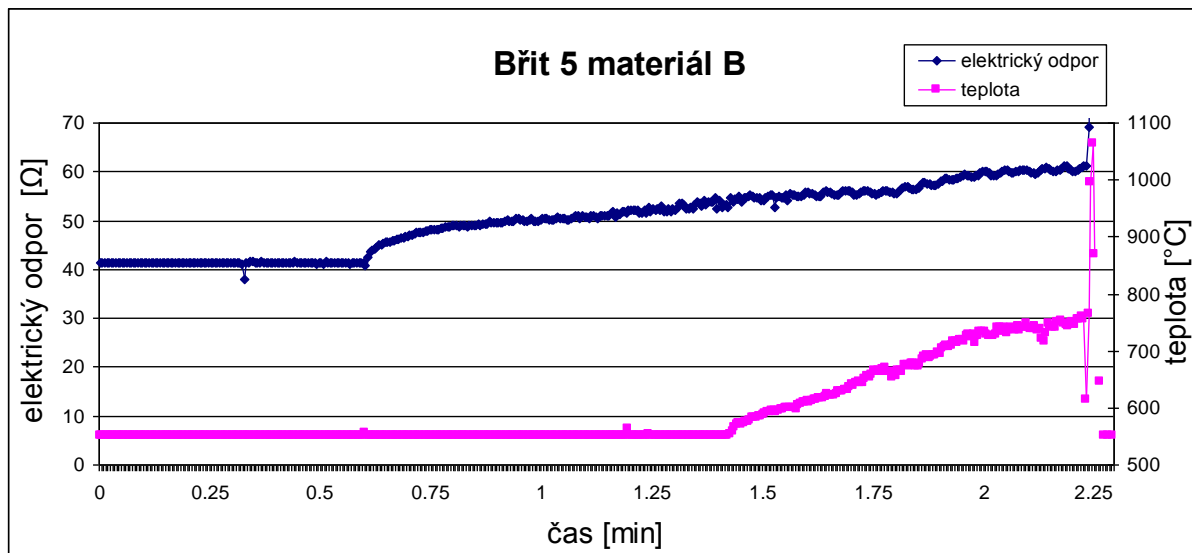
Na obr. 7.21 vlevo je vidět opotřebení na hřbetu nástroje, které přesáhlo dovolené kritérium opotřebení o velikosti  $VB_{\text{krit}}=0,7 \text{ mm}$ . To je způsobeno prodlevou při zastavení stroje. Na obr. 7.21 vpravo je žlábek na čele nástroje, opotřebení  $KB=0,3 \text{ mm}$ .



Obr. 7.21 Fotky opotřebení břitu č.4

**Měření na břitě 5**

Při obrábění břitem 5 byla použita nejnižší řezná rychlost z celého experimentu. Průběh elektrického odporu má opět pozvolný nárůst až po okamžik nepřiměřeného nárůstu elektrického odporu a také teploty.



*Obr. 7.22 Záznam z měření břitu 5 na materiálu B*

*( $v_c=209 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p=1,5$ )*

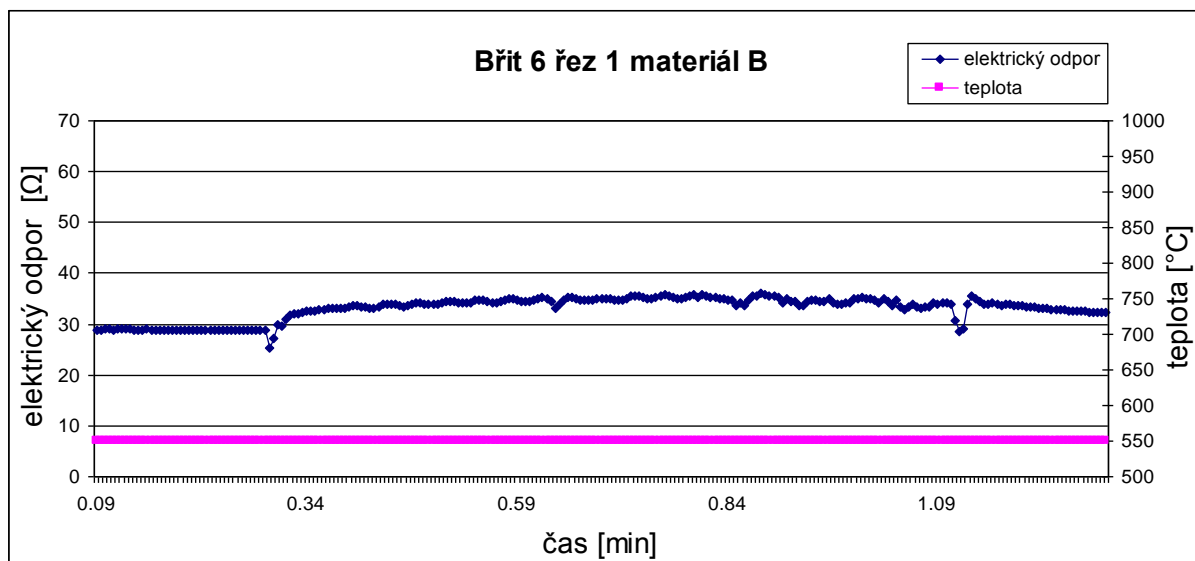
Na obr. 7.23 vlevo je vidět opotřebení na hřbetu nástroje, které přesáhlo dovolené kritérium opotřebení o velikosti  $VB_{\text{krit}}=0,7 \text{ mm}$ . To je způsobeno prodlevou při zastavení stroje. Na obr. 7.23 vpravo žlábek na čele nástroje, opotřebení  $KB=0,3 \text{ mm}$ .



*Obr. 7.23 Fotky opotřebení břitu č.1*

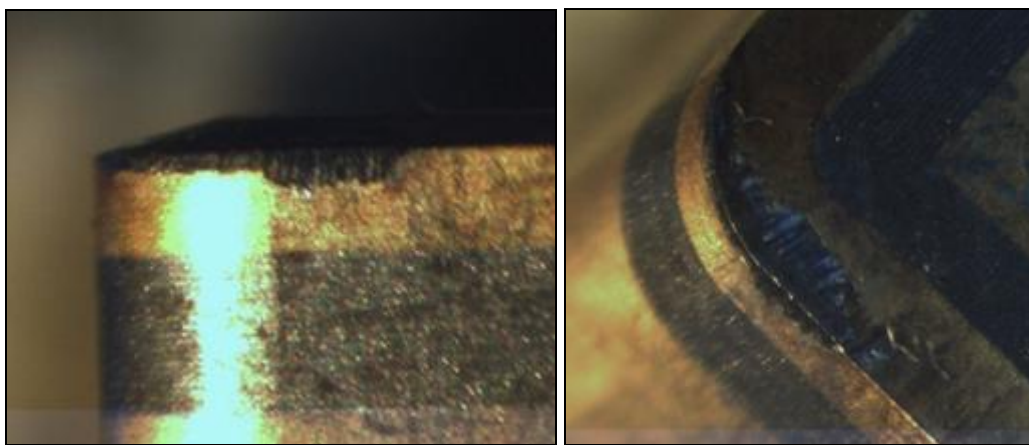
### Měření na břitě 6

Obrábění břitem 6 bylo přerušeno podobně jako u obrábění břitem 3. Na rozdíl od břitu 3 však byl břit opět nasazen do procesu obrábění a opotřeben na mez kritéria opotřebení.



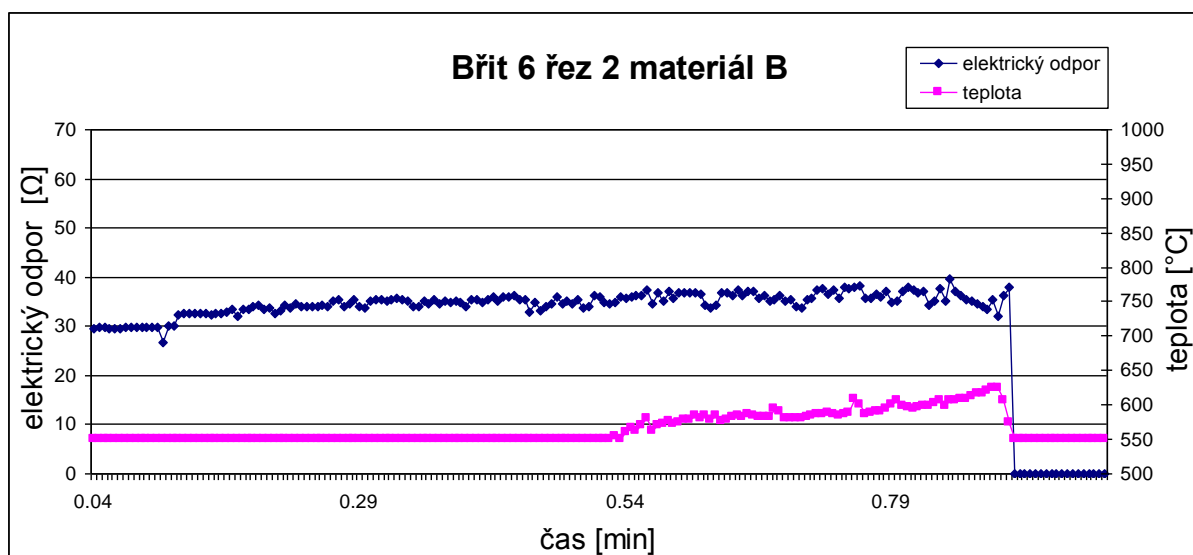
Obr. 7.24 Záznam z měření břitu 6 řez 1 na materiálu B

( $v_c=333 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ;  $f=0,1 \text{ mm}$ ;  $a_p=1,5$ )



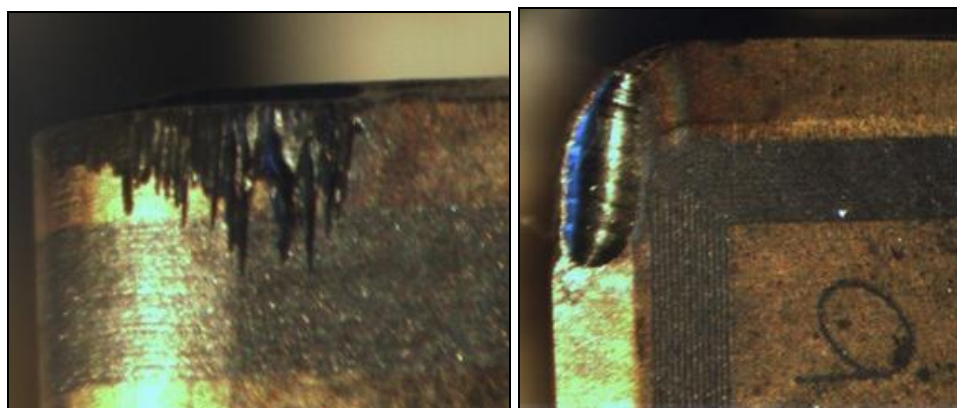
Obr. 7.25 Fotky opotřebení břitu č.6 řez 1

Na grafu obr. 7.26 je zajímavá skutečnost, kdy teplota už klesá, což by mělo znamenat ukončení řezu, a elektrický odpor má ještě několik okamžiků nenulovou hodnotu, což vede k domněnce, že abrazivní rýhy na hřbetě nástroje obr. 7.27 vznikly až po přerušení řezu, třením nástroje o přechodovou plochu obrobku, ještě než bylo odjeto nástrojem z oblasti řezání. obr. 7.27



Obr. 7.26 Záznam z měření břitu 6 řez 2 na materiálu B

( $v_c=333 \text{ m.min}^{-1}$ ;  $f=0,1\text{mm}$ ;  $a_p=1,5$ )



Obr. 7.27 Fotky opotřebení břitu č.6 řez 2

### Diskuze:

Z provedených testů je patrné, že odporová vrstva byla vždy po přerušení signálu a následném zastavení stroje přerušena. To naplňuje teoretické předpoklady chování odporové vrstvy při dosažení kritéria opotřebení. vzhledem k ovlivňování odporové vrstvy teplotou nelze z hodnoty elektrického odporu usuzovat na velikost opotřebení. Po dalším výzkumu by snad bylo možné z tendence růstu elektrického odporu usuzovat na blížící se dosažení kritéria opotřebení. Taktéž při zvýšení elektrického odporu o desítky ohmů je již možné mít představu, že se blíží dosažení kritéria opotřebení. Jen u experimentu na materiálu B se nepotvrdila možnost využití odporové vrstvy jako kovového teploměru, protože charakteristický výkmit elektrického odporu, jak jej známe z experimentu na materiálu A, na materiálu B nenastal.

## 8. Závěr

Metody zjišťování opotřebení obráběcích nástrojů jsou důležitým prostředkem pro zjišťování stavu nástroje při obrábění. Díky zjišťování stavu nástroje při sledování obráběcích parametrů a všech vstupů jdoucích do soustavy SNOP jde matematicky odhadovat budoucí opotřebení nástrojů za podmínek jiných. To vše se vykonává za účelem využití trvanlivosti obráběcího nástroje při dodržení kvalitativních parametrů obrobeného povrchu.

Vyšší nároky na diagnostiku strojů vedou k návrhům na diagnostiku obráběcích nástrojů. V současné době jsou již nabízené stroje vybaveny tzv. dálkovou diagnostikou, kdy jsou na stroji sledovány fyzikální veličiny charakterizující stav obráběcího stroje. Mezi základní ukazatele stavu stroje patří vibrace, teploty ložisek, průtoky a tlaky fluidních médií a podobně. Tyto informace jsou ukládány v systému stroje a většinou díky internetové síti odesílány do servisního střediska, kde servisní technik díky těmto datům se již dopředu může připravit na typ předpokládané poruchy obráběcího stroje.

Podobně by bylo možné také „vyladit“ řídicí systém obráběcího stroje na signál z odporové vrstvy nástroje, který by dal podněty pro výměnu břitové destičky. Dále by bylo možné ukládat informace o využití VBD, což by vedlo k zprehlednění nástrojového hospodářství.

V disertační práci byly provedeny testy odporové vrstvy nejprve na litině 25P a v druhé části experimentu na oceli 13MoCrV6. Odporová vrstva byla nanesena na nástroji z nitridické keramiky. V první části experimentu, obrábění litiny, byly nastaveny stejné rezné podmínky po celou dobu trvání experimentu ( $v_c=522-483 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  $f=0,2\text{mm}$ ;  $a_p=1,5\text{mm}$ ). Nástroj při obrábění urazil 7,8 m a obráběl 19 min na 77 řezech za maximálních otáček nastavitelných na stroji ( $n = 2000\text{min}^{-1}$ ) a stále nedosáhl kritéria opotřebení. Z průběhu experimentu lze doporučit využití nitridické keramiky pro obrábění litiny 25P. Další experimenty na litinových materiálech byly z důvodů časové náročnosti vyloučeny. Test dále pokračoval na oceli 13MoCrV6 kde proběhly testy na šesti břitech při různých rezných parametrech. Díky velmi rychlému opotřebování břitů nástroje na oceli 13MoCrV6 bylo možné břity vyměnitelné břitové destičky testovat až k dosažení kritéria opotřebení. Při experimentech bylo naměřeno množství dat, která byla zpracována do grafů a poté hodnocena.

Z výsledků experimentů **lze potvrdit možnost využití odporových vrstev k zjišťování dosažení kritéria opotřebení** a to na obou testovaných materiálech.

Při obrábění litiny se objevil nepředpokládaný výkmit elektrického odporu, který byl vysvětlen pomocí teplotního součinitele elektrického odporu  $\alpha$ , jenž má vliv na elektrický odpor při změně teploty. Z přidruženého experimentu byl stanoven na hodnotu  $\alpha = (0,463 \cdot 10^{-3} \pm 0,029 \cdot 10^{-3}) \text{ K}^{-1}$ . V tomto experimentu byla zjištěna podobnost s charakteristickou závislostí poměru odporů termistoru na teplotě. Bohužel při obrábění ocelového materiálu podobný výkmit nenastal, proto doporučuji další zkoumání tohoto jevu.

Použité vyměnitelné destičky s nanesenou odporovou vrstvou jsou prototypem, tudíž stanovit ekonomický přínos s využitím v praxi je značně problematické.

## 8.1. Vědecký přínos

V mnohé literatuře, týkající se opotřebování obráběcích nástrojů a metodami jejich sledování, se vyskytuje zmínka o metodě zjišťování opotřebování pomocí odporové vrstvy. Jen v několika málo článcích se lze dočíst i o praktických testech a to většinou v literatuře z Japonska. V těchto článcích však není prostor pro detailnější popis této metody, tudíž tato disertační práce je základním kamenem v experimentálním ověřování této metody na naší universitě.

Při zpracování této disertační práce se objevily další skutečnosti a možnosti využití odporových vrstev. Například použitím stejného materiálu povlaku se známým chováním elektrického odporu za vysokých teplot by bylo možné za určitých podmínek měřit teploty.

## 8.2. Závěry pro praxi

Cílem všech firem je funkční výrobek s požadovanými vlastnostmi. K dosažení tohoto cíle je používáno mnoho technologických metod. Mezi nimi i technologie na principu třískového obrábění. Při použití těchto metod se velmi často používají nástroje s VBD. Každý obráběcí nástroj je po nějakém čase opotřebovaný a je třeba ho vyměnit.

Pokud se jedná o kusovou výrobu, celý obráběcí proces hlídá obsluha stroje. S přispěním zkušenosti podle různých ukazatelů pozná blížící se konec trvanlivosti nástroje, v některých případech až destrukci břitu. Tato situace může vést k poškození obrobenej plochy nebo k poškození držáku VBD, v extrémním případě poškození stroje.

V automatizovaných procesech se raději nastavuje doba využití destičky na nižší hodnotu, než je předpokládaná doba trvanlivosti. Tento postup však nevede k hospodárnému využití vyměnitelných břitových destiček.

S metodou sledování opotřebení vyměnitelných břitových destiček během řezu by bylo možné využívat VBD až po dosažení daného kritéria opotřebení, čímž by se docílilo hospodárného využití VBD.

Nástroj tím, že je odporová vrstva přerušena a neprobíhá obvodem elektrický proud, dává řídicímu systému signál pro okamžité přerušení procesu obrábění a výměnu nástroje. Z dosavadních testů této metody se tento předpoklad jeví jako velmi pravděpodobný.

V rámci disertační práce se potvrdilo několik předpokladů a doporučení známých z literatury. Potvrdila se vhodnost využití řezné keramiky na bázi  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pro obrábění litiny. Z negativního hlediska se bohužel potvrdila i tvrzení o nevhodnosti využití nitridické keramiky pro obrábění oceli při vyšších teplotách řezání.

Pro praktické využití by bylo potřeba otestovat metodiku sledování opotřebení břitových destiček během řezu v konkrétním provozu.

### 8.3. Doporučení pro další zkoumání

Problematika testování odporové vrstvy je velmi rozsáhlé téma a v rámci prvotních testů se projeví další nečekané skutečnosti. Proto je nutné snažit se tyto problémy a oblasti touto prací nepostihnuté sumarizovat a při dalším výzkumu se na ně zaměřit.

Doporučení:

- Testovat VBD s odporovou vrstvou na přerušovaném řezu,
- Testovat VBD s odporovou vrstvou s chlazením (pro zjištění ovlivnění elektrického obvodu procesní kapalinou),
- Testovat další druhy litin a ocelí,
- Testovat odporovou vrstvu z hlediska měření teplot,
- Testovat VBD s odporovou vrstvou na jiném druhu keramiky.
- Testovat možnosti nanesení odporové vrstvy na keramický povlak na slinutém karbidu.



## Work conclusion

The tests in dissertation thesis were performed on the first resistive layer 25P alloy, and the second part of the experiment on steel 13MoCrV6. Resistive layer was applied to the cutting tools from silicon nitride based ceramics. First one in the experiment, the machining of cast iron, were set the same cutting conditions for the duration of the experiment ( $v_c = 522\text{--}483 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$   $f = 0.2 \text{ mm}$ ,  $a_p = 1.5 \text{ mm}$ ). Tool during machining has traveled 7.8 m and worked 19 min at 77 sections of the selectable maximum speed of the machine ( $n = 2000\text{min}^{-1}$ ) and still has not reached the criteria for wear. In the course of the experiment may recommend the use silicon nitride ceramics for machining of cast iron 25P. Additional experiments on cast-iron materials were excluded due to time demands. Test continued on steel 13MoCrV6 have held six tests are supported by cutting tools in various cutting parameters. Due to very rapid tool wear of the cutting edge on steel 13MoCrV6 be tipped indexable inserts tested to achieve the criteria for tool wear. Experiments were measured quantity of data that was processed into graphs and then evaluated.

From the results of the experiments we can confirm the possibility of using resistive layers to achieve the criteria for determining wear on both the tested materials. During machining of cast iron appeared interesting aptitude of electrical resistance, which has been explained by the temperature coefficient of electrical resistance  $\alpha$ , which affects the electrical resistance change of temperature. From the satiated experiment has been set to  $\alpha = (0,463 \cdot 10^{-3} \pm 0,029 \cdot 10^{-3}) \cdot K^{-1}$ . In this experiment was found the similarity with a characteristic dependence on the relative resistance of the thermistor temperature.

Used interchangeable inserts coated with a resistive layer are prototype, and thus provide an economic benefit to using in practice is problematic.

## Recommendations for further research

The issue of testing the resistance layer is a very broad topic, that's why the further tests are needed. After processing of the dissertation work thesis can be recommended area for further study.

- Testing of inserts with resistive layer on the during interrupted cutting,
- Testing of inserts with resistive– layer cooled,
- Testing of other types of iron and steel,
- Testing of resistive layer in terms of temperature measurements,
- Testing of inserts with resistive layer on different types of ceramics.

**Použitá literatura:**

- [1] AB SANDVIK COROMANT - SANDIK CZ s.r.o. *Příručka obrábění - Kniha pro praxe*. Přel. M. Kudela. 1. vyd. Praha: Scientia, s. r. o. 1997. 857 s. Přel. z: Modern Metal Cutting - A Practical Handbook. ISBN 91-97 22 99-4-6.
- [2] SCHNEIDER J. Řezná keramika v třískovém obrábění. *PRAMET '96 – Progresivní řezné nástroje*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava, 1996, s. 52 – 72.
- [3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní, Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2007. 343s. ISBN 978-80-8070-7011-8
- [4] JURKO, J. Opotrebenie rezných nástrojov, Prešov, 2005,ISBN 80-8073-255-8
- [5] POPEOVÁ. *Monitorovanie opotrebenia rezných nástrojov*, Vydavateľstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2001 ISBN80-7100-700-5
- [6] VASILKO, K.; HRUBÝ, J.; LIPTÁK, J. *Technológia obrábania a montáže*.ALFA Bratislava 1988, 1991. 496s. ISBN 80-05-00807-4
- [7] *Kyocera* [online]. 2009 [cit. 2009-05-10]. Kyocera.com. Dostupné z WWW: <[http://americas.kyocera.com/KICC/cerapip/grades\\_ceramic.html](http://americas.kyocera.com/KICC/cerapip/grades_ceramic.html)>.
- [8] *Serie KTR 1085*. [online] URL: <<http://www.maurer-ir.de/>> [citováno 20.října 2009].
- [9] *Technical specifications*. [online]  
URL:<[http://www.bis.fm/assets/documents/faxdatasheets/FLIR%20E45%20Datasheet.p](http://www.bis.fm/assets/documents/faxdatasheets/FLIR%20E45%20Datasheet.pdf)  
df> [citováno 16.dubna 2009].
- [10] <http://www.sgac-turnov.cz/index.php?content=210&lang=cs> [citováno 20.října 2009].
- [11] HUMÁR, Antonín: *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ – 1. část* Studijní opory pro magisterskou formu studia . 2003
- [12] PŘIKRYL, Z. - MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*, SNTL Praha, 1982.
- [13] Samuels, J. - Tani, M. - Beiswenger, C. I.: *Measurements of crater wear using replica molds*, CIRP 1/1976, pp. 77
- [14] BILÍK, Oldřich. *Obrábění II*. 2. díl, II.vydání. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2001. 118 s. ISBN 80-7078-944-1.
- [15] Giusti, F. - Santochi , M. – Tantussi, G.: *On line sensing of flank and crater wear of cutting tools*, CIRP, 1/1987, pp. 41
- [16] ŽIŽKA, J.: *Použití akustické emise ke sledování stavu řezného nástroje*. Liberec : TU Liberec, 2003. 106. s ISBN 80-7083-687-1

- [17] VASILKO, Karol. *Analytická teória trieskového obrábania*. Fakulta výrobních technológií TU v Košiciach, so sídlom v Prešove: Prešov 2007. 338s ISBN: 978-80-8073-759-7
- [18] *Základy bezdotykového měření teploty pásmovým radiačním pyrometrem*. [online] URL: <<http://pyrometrie.sweb.cz/Zaklady.htm>> [citováno 12. prosince 2009].
- [19] *Příručka obrábění*. Šumperk : Pramet Tools, s.r.o., 2003. 100 s.
- [20] *Katalog soustružení pramet*. Šumperk : Pramet Tools, s.r.o., 2010. 328 s
- [21] Jurko, J.; Zajac, J.; Čep, R.: *Top trendy v obrábění. II. část – Nástrojové materiály*.
- [22] Neslušan, M.; *Soustružení kalených ocelí*. Vydavatelstvo ŽU EDIS Žilina: Žilina 2009. 253s. ISBN 978-80-554-104-1
- [23] Tabaček, M.: *Sústruženie ocele 14 109 tepelne spracované na bainitickú štruktúru*, DDP 2007, KOA, Sjf, ŽU, (vedúci práce Neslušan, M.)
- [24] Ueda, N. Al Huda, M. Yamada, K. Nakayama, K.: Temperature Measurement of CBN Tool in Turning of Hardened Steel, CIRP Annals 48/1/1999 p.63-66
- [25] HUMÁR, Anton; FOREJT, Milan; PÍŠKA, Miroslav. *Experimentální metody : syllabus* [online]. Brno : [s.n.], 2003 [cit. 2010-01-10]. Dostupné z WWW: <[http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory\\_soubory/experimentalni\\_metody\\_\\_cviceni\\_\\_forejt\\_piska\\_humar\\_janicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/experimentalni_metody__cviceni__forejt_piska_humar_janicek.pdf)>.
- [26] Reznikov, A.N.: *Teplofizika rezania*, Mašinstrojenie Moskva 1969
- [27] Brichta, Čep, Petřskovská, Nováková, *Technologie II*. Ostrava 2007 ISBN 978-80-248-1641 120s
- [28] MÁDL, J. - SCHUBERT, V.: *Experimentální metody a optimalizace v teorii obrábění*. Praha : ČVUT Praha, 1985
- [29] PŘIKRYL, Z. – MUSÍLKOVÁ, R.: *Teorie obrábění*. 3. opravené vydání, Praha : SNTL Praha, 1982
- [30] Smutný  
[http://fs1.vsb.cz/3\\_SMUTNY/Predmety/07\\_Senzorova%20technika/Lab%20Senzorove%20techniky\\_Ulohy-navody/4b-parametry%20termistoru.doc](http://fs1.vsb.cz/3_SMUTNY/Predmety/07_Senzorova%20technika/Lab%20Senzorove%20techniky_Ulohy-navody/4b-parametry%20termistoru.doc)
- [31] *Odbornecasopisy.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-05-06]. Teplotní závislost odporu kovových vodičů. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=36489](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36489)>.
- [32] BAREŠ, Michal . *Laboratorní praktika* [online]. 2004 [cit. 2010-05-06]. Charakteristiky termistoru. Dostupné z WWW: <<http://www.nitelite.eu/praktika/II/laborky2.doc>>

- [33] MRKVICA, I Application of Coated Cemented Carbides at Hardened Gear Cutting. In The International Congress MATAR PRAHA 2004, Section 4 Machining and forming processes. Praha: ČVUT Praha, 2004, s. 213-216. ISBN 803421-4-0.
- [34] ŠKABRAHA, Stanislav. Obrábění kalených materiálů řeznou keramikou [online]. MM průmyslové spektrum, 12/2008 [cit. 12. dubna 2009]. URL: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/obrabeni-kalenyh-materialu-reznoukeramikou>>
- [35] MAŤEJKA, J.; ČESÁNEK, J.; KŘÍŽ, A. Vývojové trendy v oblasti řezné keramiky. Vrstvy a povlaky 2005. Trenčín: DIGITAL GRAPHIC, 2005. 133- 136 s. ISBN 80-969310-1-6.
- [36] ThermaCAM™ E45 : Uživatelská příručka. *Manuál* 2006, publ.no.1558044.176s
- [37] VASILKO, Karol. *Technológia dokončovania povrchov*. Prešov, 2004. 116 s. ISBN 80-7073-124-1.
- [38] HILDER, Terry. *CNC-mozek stroje*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 38-39. ISSN 1212-2572.
- [39] ZELENÝ, Jaromír. *Nástup HSC technologií do průmyslové praxe*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č.6, s. 22-23. ISBN 80-85986-19-1.
- [40] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie obrábění*. Vysoké učení technické v Brně, 2004. 127 s. ISBN 80-214-2562-8.
- [41] BRYCHTA, Josef. *Možnosti zvyšování efektivity obrábění prostorových ploch nepravidelných tvarů frézováním*. (Habilitační práce). Ostrava, VŠB - TU Ostrava, 2001. 124 s..
- [42] ŠTĚDRÝ, Jan. *Směry vývoje CNC řízení po roce 2000 v praxi*. MM Průmyslové spektrum, 2003, č.5, s. 36-37. ISSN 1212-2572.
- [43] ZELENÝ, Jaromír. *Vliv HSC technologií na stavbu obráběcích strojů*. MM Průmyslové spektrum, 2000, č.6, s. 24-27. ISBN 80-85986-19-1.
- [44] KURIC, Ivan; KOŠTURIK Ján; JANÁČ, Alexander; PETERKA Josef; MARCINČIK Josef: *Počítačom podporované systémy v strojárstve*. Žilinská univerzita v Žilině, 2004. 351 s. ISBN 80-7100-948-2.
- [45] GREY, P.; BENDI, S.; ISMAIL, F.; RAO, N.; MORPHY G.. *Comparison of 5-axis Finis Machining of Hydroforming Die Inserts*. Advanced Manufacturing Technology, 2001. Springer-Verlag London Limited.

**Publikační činnost autora:**

- [1] KRATOCHVÍL, J.; SADÍLEK, M.; KÚDELOVÁ, Z.; VRBA, V. Testing Impedance Layer on Inserts of Cutting Ceramic. *Technologické inženýrstvo – Technological engineering. Scientific-Technical Society by University of Žilina*, Vol. VI, number 2/2009, pp. 45 – 47, ISSN: 1336-5967.
- [2] SYSEL, P.; SADÍLEK, M.; KÚDELOVÁ, Z.; KRATOCHVÍL, J. Použití typové technologie v CAD/CAM systému EdgeCAM. Sborník abstraktů, Strojní fakulta, Západočeská Univerzita v Plzni Mezinárodní konference mladých výzkumníků a doktorandů. ERIN 2010. s. 75, 2010. ISBN 978-80-7043-866-4
- [3] KRATOCHVÍL, J.; NOVÁKOVÁ, J. zjišťování stavu opotřebení keramické břitové destičky při řezu . In *Progressive Methods in Manufacturing Technologies” Medzinárodné sympóziu, projekt CEEPUS CII–CZ–0201-02-0809-M-24413, Súľov 6.-8. listopadu 2008*, s. 102. ISBN 978-80-89276-13-4.
- [4] KRATOCHVÍL, J.; ČEP, R.; OČENÁŠOVÁ, L.; Diagnostic of Cutting Edge During Machining. In *The International Conference of the Carpathian Euro-Region Specialists in Industrial Systems. Baia mare 21.-23. May 2008* . Ed. Universitatii de Nord din Baia Mare, 2008, s. 500. ISSN 1224-3264.
- [5] KRATOCHVÍL, Jiří; Dialogové programování HEINDENHAIN. In. *WORKSHOP Fakulty strojní 2004. Ostrava : VŠB - TU Ostrava*, 2004, s. 14. ISBN 80-248-0521-9.
- [6] BILÍK, Oldřich; Kratochvíl, Jiří; Nová technologie výroby ozubení řetězového kola. In *IV medzinárodná vedecká konferencia Strojárska technológia 2004. Žilina: ŽU v Žiline*, 2004, s. 139-141. ISBN 80-8070-300-0.
- [7] ČEP, Robert; KRATOCHVIL, Jiri; VRBA, Vladimir; HATALA, Michal. Using of Indentant Techniques to Determination of Ceramic Materials Mechanical Properties. *Sborník vědeckých prací VŠB-TU Ostrava, řada strojní. 2007, roč. LIII, č. 1, s. 23 – 28. ISSN 1210–0471.*
- [8] SADÍLEK, Marek; KRATOCHVÍL, Jiří; Zkracování strojních časů při frézování kapes. In. *SYMDOK 2005 - medzinárodne sympóziu doktorandov strojárskych technológií. Terchová : ŽU Žilina*, 2005, s. 21 + sborník na CD.
- [9] KRATOCHVÍL, Jiří; Zvyšování jakosti soustružení s využitím CAD/CAM Esprit. In. *WORKSHOP Fakulty strojní 2005. Ostrava: VŠB - TU Ostrava*, 2005, s. 60 + sborník na CD. ISBN 80-248-0750-5.

- [10] KRATOCHVÍL, Jiří; SADÍLEK, Marek; Zkracování strojních časů při frézování kapes. *Technological Engineering*, 2005, roč. II., č. 1, s. 57 - 60. ISSN 1336 - 5967.
- [11] KRATOCHVÍL, Jiří; OTÁHAL, Daniel; VRBA, Vladimír; Využití intendantních technik k určování mechanických vlastností keramických materiálů. *In VI. Medzinárodné sympóziu doktorandov strojárskych technológií - SYMDOK 2006*. Technická konferencia. Súl'ov: Žilinská univerzita v Žilině 2006, s. 21 + sborník na CD. ISBN 80-969546-6-0.

**Seznam obrázků:**

Obr. 3.1 a) mlýnice, b) korundové koule Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s	11
Obr. 3.2 hnětač keramické směsi [21Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s	12
Obr. 3.3 a) extudované tyče b) vytlačovací patrony [21Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s	13
Obr. 3.4 Slinovací proces [21Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s	16
Obr. 3.5 Technologické schéma výroby VBD z řezné keramiky [21Šumperk : Pramet Tools,s.r.o., 2010. 328 s	17
Obr. 3.6 Rozsah použití druhů řezných keramik[35]	21
Obr. 4.1 Ukázka opotřebení hřbetu bříty z experimentu	25
Obr. 4.2 Ukázka opotřebení čela bříty z experimentu vlevo při obrábění litiny vpravo oceli	25
Obr. 4.3 Ukázka plastické deformace bříty [20]	26
Obr. 4.4 Ukázka opotřebení na hlavním hřbetě bříty [20]	26
Obr. 4.5 Ukázka hřebenových trhlin na ostří [20]	27
Obr. 4.6 Ukázka vydrolování ostří [20]	27
Obr. 4.7 Ukázka lomu nástroje	28
Obr. 4.8 Ukázka nárůstku [20]	28
Obr. 4.9 Kritéria opotřebení řezného nástroje dle ISO 3685 [19]	30
Obr. 4.10 Typické průběhy opotřebení VB a KT na době řezání [19]	31
Obr. 4.11 Typický projev opotřebení	33
Obr. 4.12 Příklad opotřebení na čele nástroje, profilu kráteru a jeho mapy [13]	36
Obr. 4.13 Schéma měření stínovou metodou [14]	37
Obr. 4.14 Způsob osvětlení čela nástroje [15]	37
Obr. 4.15 Princip měření pneumatickou metodou [14]	38
Obr. 4.16 Schéma experimentálního zařízení na měření akustických emisí [16]	42
Obr. 5.1 Závislost teploty řezání na řezné rychlosti, $a_p=0,25$ mm, $Al_2O_3+TiC$ (TiN povlak DNGA150408), 100Cr6, $f=0,09$ mm, kroužky $\varnothing$ 50mm, VB 0,1 mm [23]	43
Obr. 5.2 Schéma zapojení termočlánu[3]	44
Obr. 5.3 Přirozený termočlánek[25]	45
Obr. 5.4 Schéma zapojení termodu[25]	46
Obr. 5.5 Schéma zapojení poloumělého termočlánu [25]	47
Obr. 5.6 Schéma zapojení umělého termočlánu[25]	47
Obr. 5.7 Umělý termočlánek pro nástroj s vyměnitelnou břitovou destičkou[28]	48

Obr. 5.8 Charakteristické závislosti termistorů na teplotě [30]	49
Obr. 5.9 Foto součásti v peci vyfocena termokamerou flir.	53
Obr. 5.10 Závislost chyby měření pyrometru[18]	54
Obr. 6.1 Struktura experimentu	57
Obr. 6.2 Použitý obráběcí stroj	58
Obr. 6.3 Použitá VBD	59
Obr. 6.4 Doporučený pracovní rozsah nástrojového materiálu	60
Obr. 6.5 Polotovar materiálu A	62
Obr. 6.6 Polotovar materiálu B	63
Obr. 6.7 schéma upnutí polotovaru A	64
Obr. 6.8 Infrapyrometr MAUER - KTR 1085-1 [8]	64
Obr. 6.9 Zaostřovací parametry optiky [8]	65
Obr. 6.10 Ukázka měření s infrapyrometrem MAURER - KTR 1085-1	66
Obr. 6.11 Termokamera FLIR E45[9]	67
Obr. 6.12 Nožový držák s kontakty na přenos elektrického signálu.	68
Obr. 6.13 Řezné destičky s nanesenou odporovou vrstvou	68
Obr. 6.14 Dataloger ALMEMO 2590-4S	69
Obr. 6.15 Ukázka záznamu z měření.	69
Obr. 6.16 Schéma zapojení měřicího zařízení	70
Obr. 6.17 Dílenský mikroskop	70
Obr. 6.18 Objektivová měrka	71
Obr. 6.19 Ukázka z měření	71
Obr. 7.1 Teplotní pole [11] s vyznačením snímání teploty.	74
Obr. 7.2 Grafické znázornění měření řezu č.60-62	75
Obr. 7.3 Ukázka z měření termokamerou Flir.	76
Obr. 7.4 Snímek termokamerou flir při obrábění materiálu B	77
Obr. 7.5 Grafické znázornění řezu č.58	78
Obr. 7.6 Charakteristika závislosti poměru odporů na teplotě	80
Obr. 7.7 Ggraf záznamu průběhu odporu a teploty na břitě č.1 materiálu B	81
Obr. 7.8 Řez 12 a řez 77.	82
Obr. 7.9 Pohled na břit po 77 řezu s patrným hřbetním nárůstkem	82
Obr. 7.10 Grafické znázornění řezu č.47 ( $v_c=483 \text{ m.min}^{-1}$ ; $f=0,2\text{mm}$ ; $a_p=1,5$ )	83
Obr. 7.11 Grafické znázornění řezu 48 ( $v_c=522\text{m.min}^{-1}$ ; $f=0,2\text{mm}$ ; $a_p=1,5$ )	84
Obr. 7.12 Závislost odporu při jednotlivých řezech na čase	85



Obr. 7.13 Závislost opotřebení a elektrického odporu na čase $V_B(t)$ a $R(t)$	86
Obr. 7.14 Záznam z měření břitu 1 na materiálu B	87
Obr. 7.15 Fotky opotřebením břitu č.1	87
Obr. 7.16 Záznam z měření břitu 2 na materiálu B ( $v_c=280 \text{ m.min}^{-1}$ ; $f=0,2\text{mm}$ ; $a_p=1,5$ )	88
Obr. 7.17 Fotky opotřebením břitu č.2	88
Obr. 7.18 Záznam z měření břitu 3 na materiálu B	89
Obr. 7.19 Fotky opotřebení břitu č.1	89
Obr. 7.20 Záznam z měření břitu 4 na materiálu B	90
Obr. 7.21 Fotky opotřebení břitu č.4	90
Obr. 7.22 Záznam z měření břitu 5 na materiálu B	91
Obr. 7.23 Fotky opotřebení břitu č.1	91
Obr. 7.24 Záznam z měření břitu 6 řez 1 na materiálu B	92
Obr. 7.25 Fotky opotřebení břitu č.6 řez 1	92
Obr. 7.26 Záznam z měření břitu 6 řez 2 na materiálu B	93
Obr. 7.27 Fotky opotřebení břitu č.6 řez 2	93

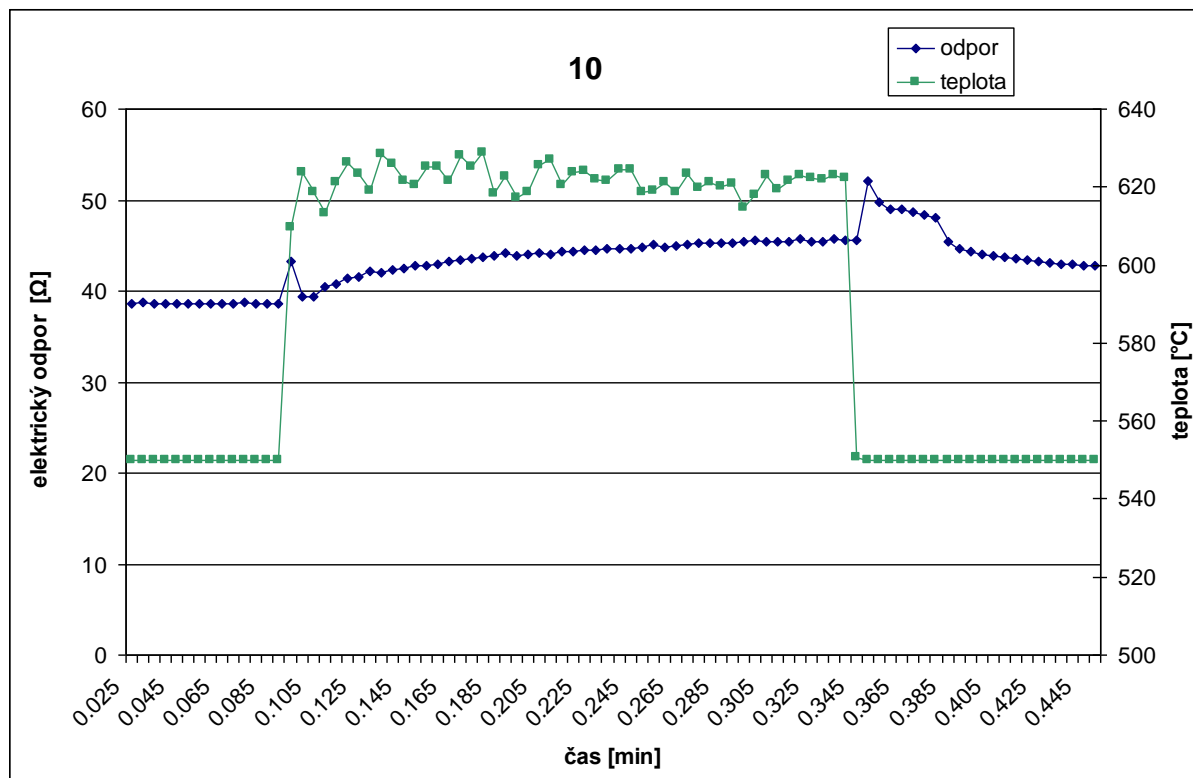
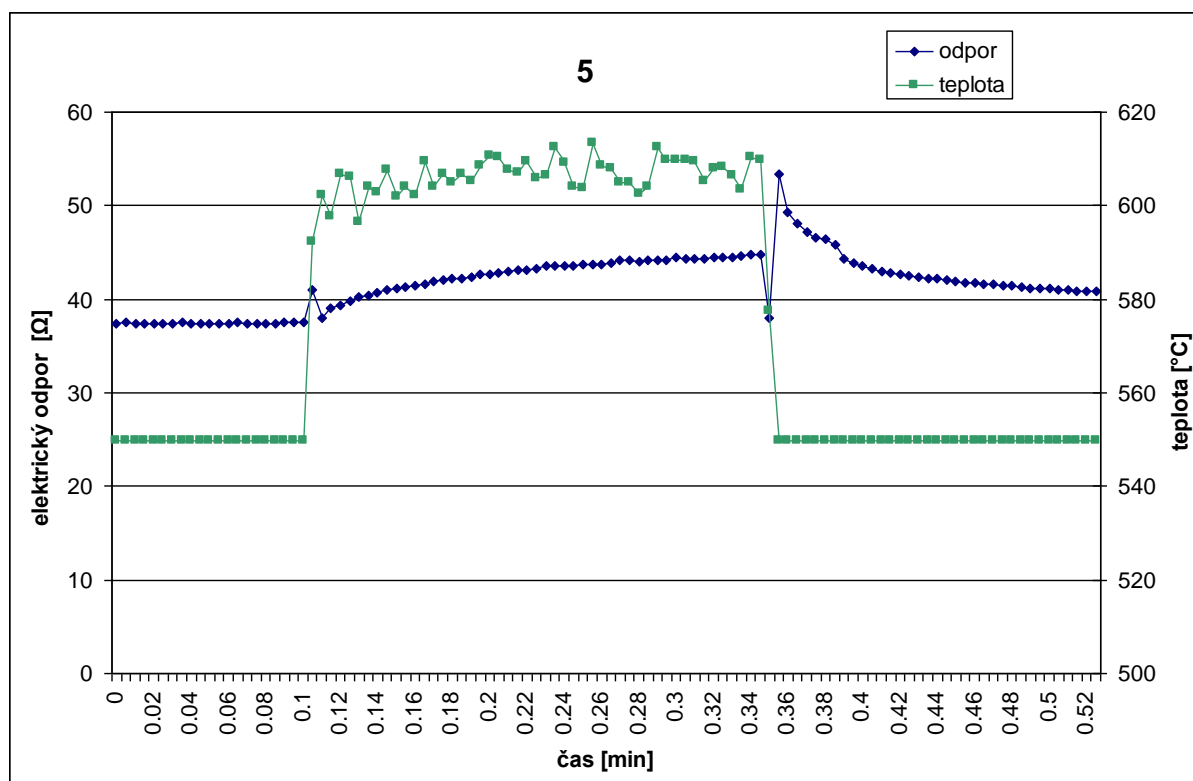
**Seznam tabulek:**

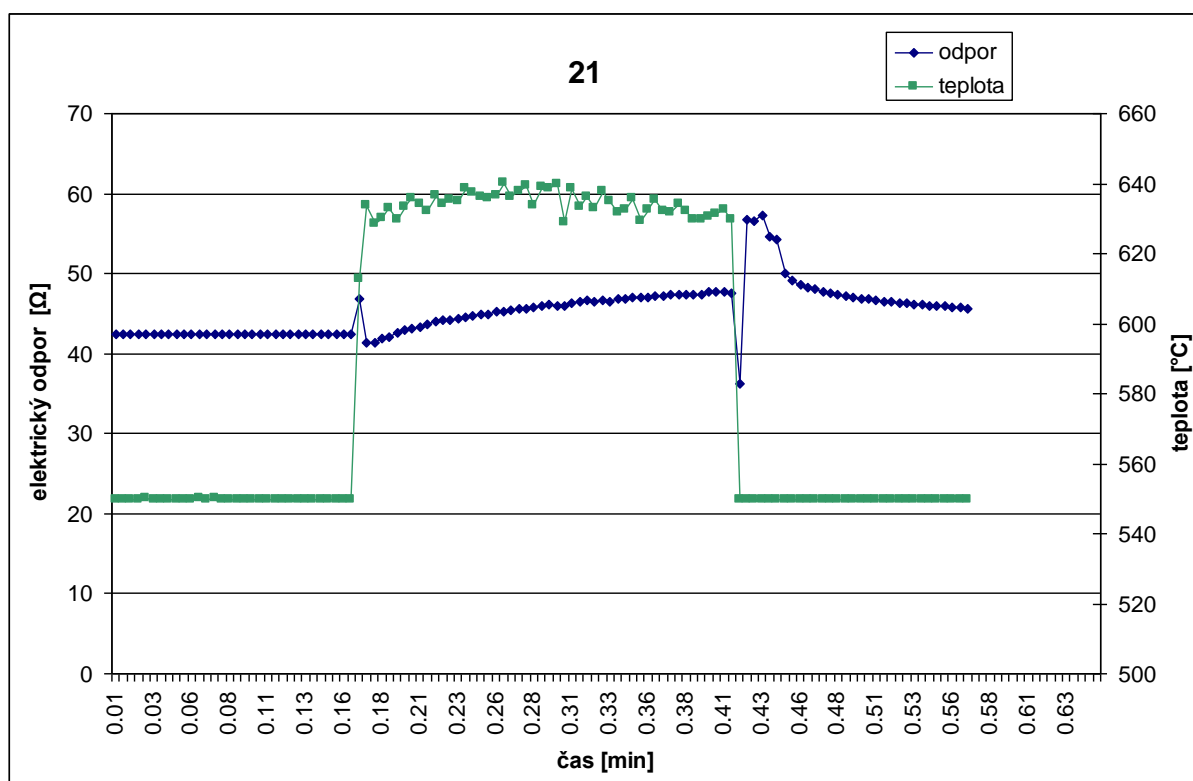
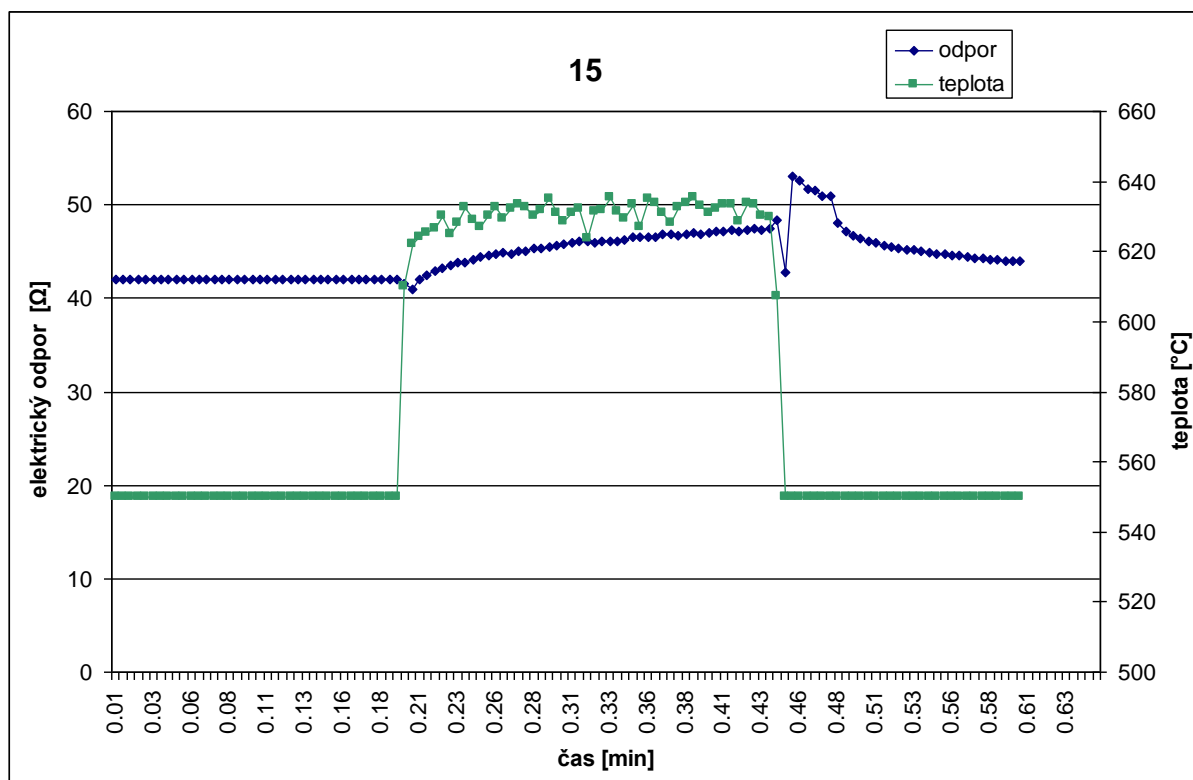
Tab. 3.1 Oblasti využití nástrojů z řezné keramiky [35]	20
Tab. 4.1 Kritérium opotřebení pro některé typy obrábění [17]	32
Tab. 6.1 Aplikace dle výrobce[7]	59
Tab. 6.2 Identifikace držáku <b>XCSRNR2525M-1207SEN</b> .	61
Tab. 6.3 Chemické složení materiálu 25P	62
Tab. 6.4 Mechanické vlastnosti materiálu 25P	62
Tab. 7.1 Tabulka řezných podmínek	73

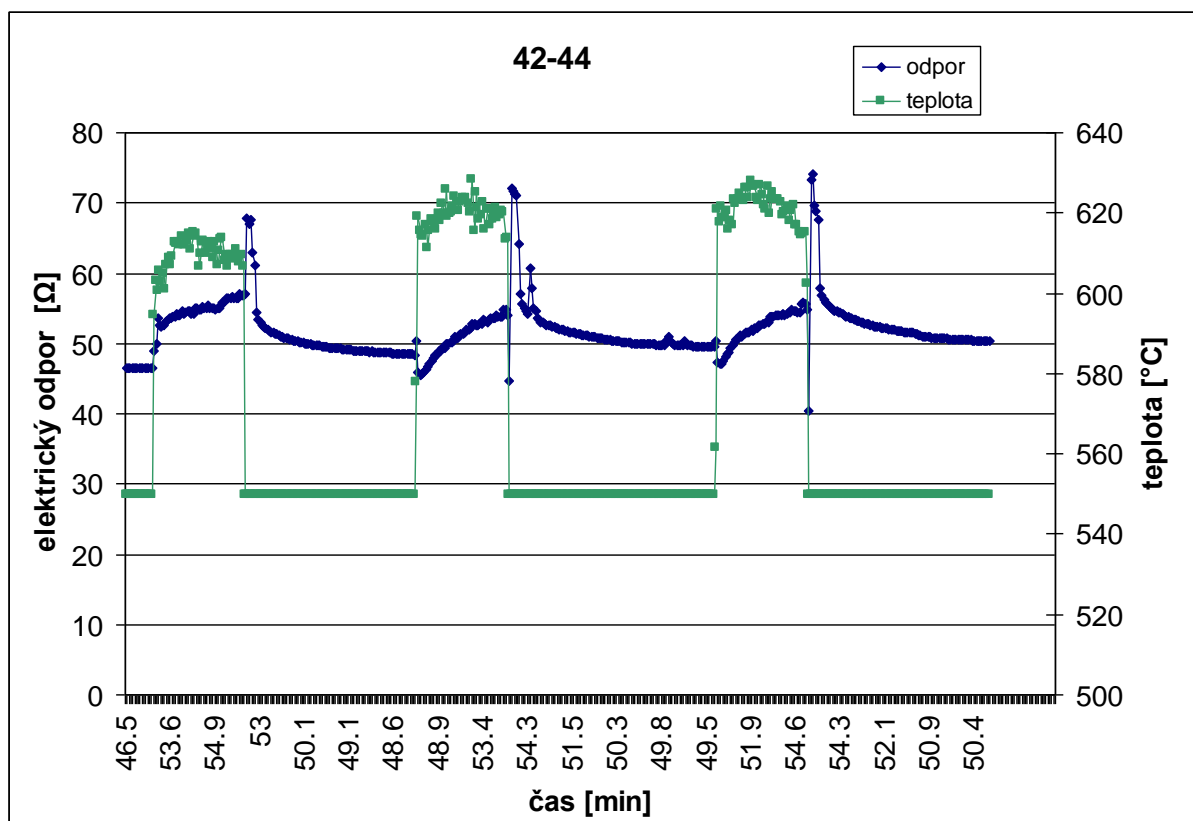
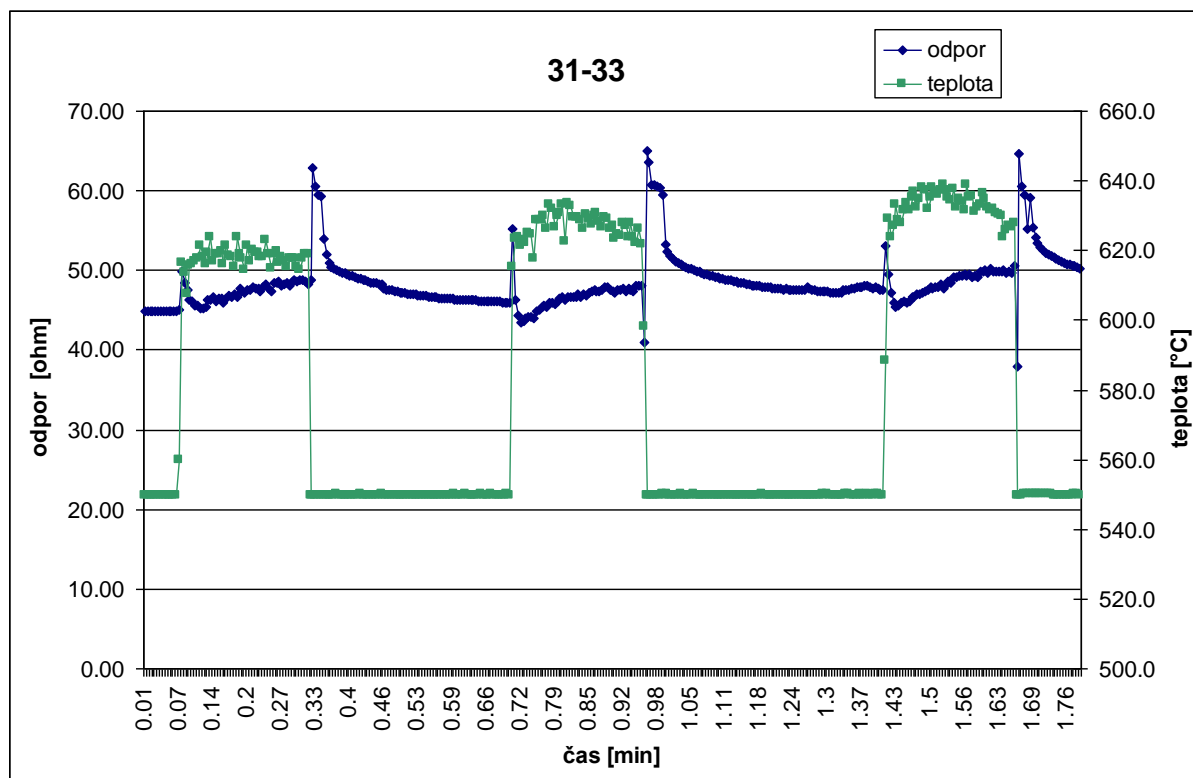
**Seznam příloh:**

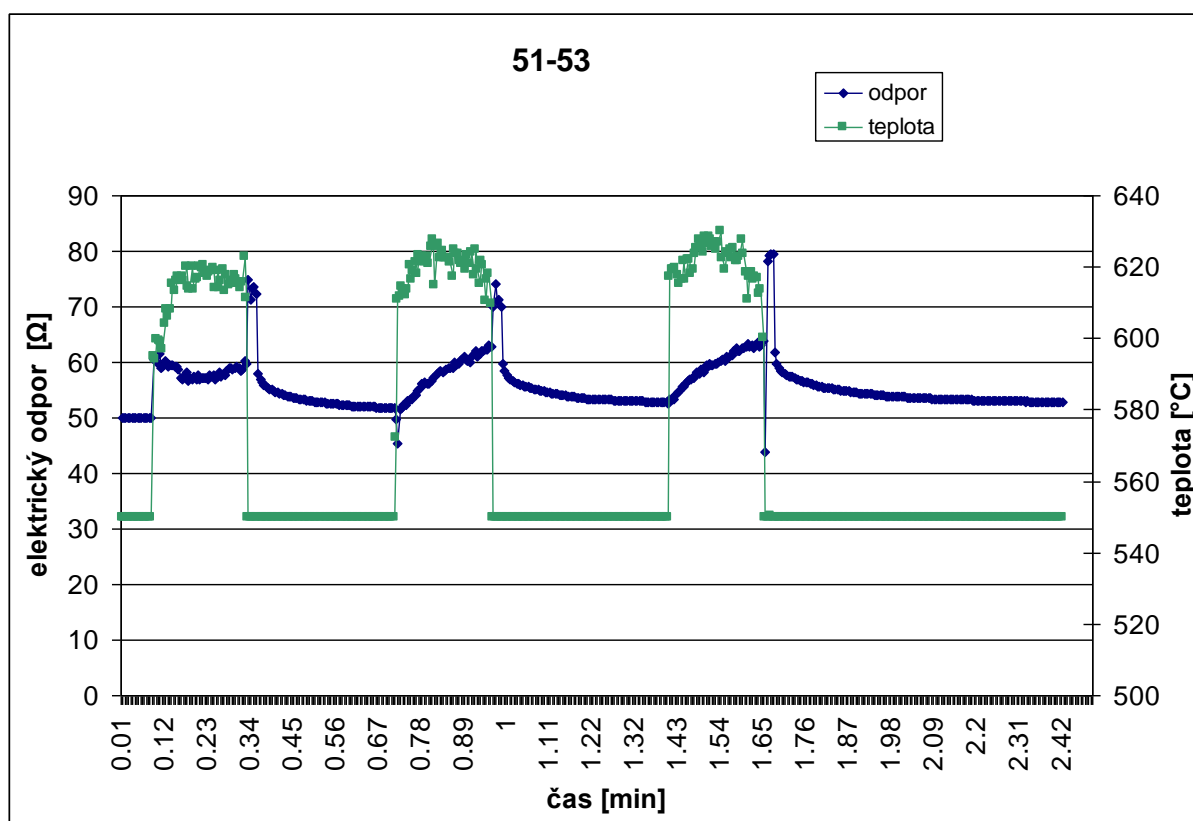
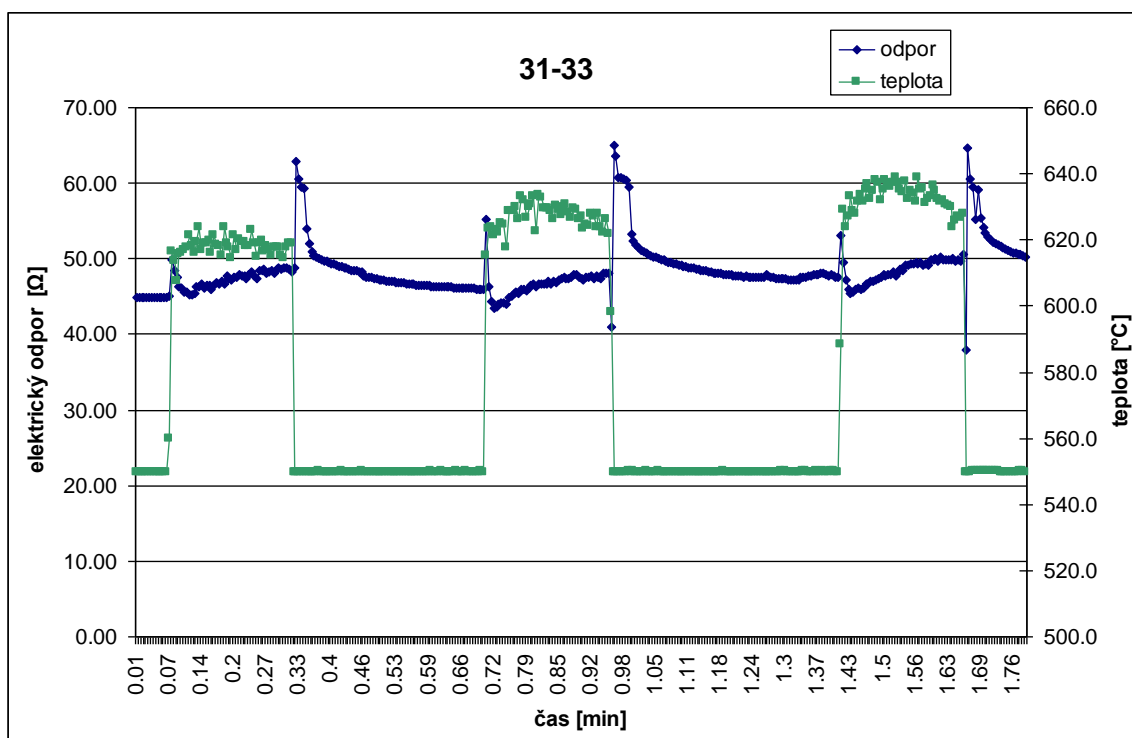
Příloha č. 1 Vybranné grafy z měření na materiálu A	108
Příloha č. 2 Tabulky emisivity. [36]	116

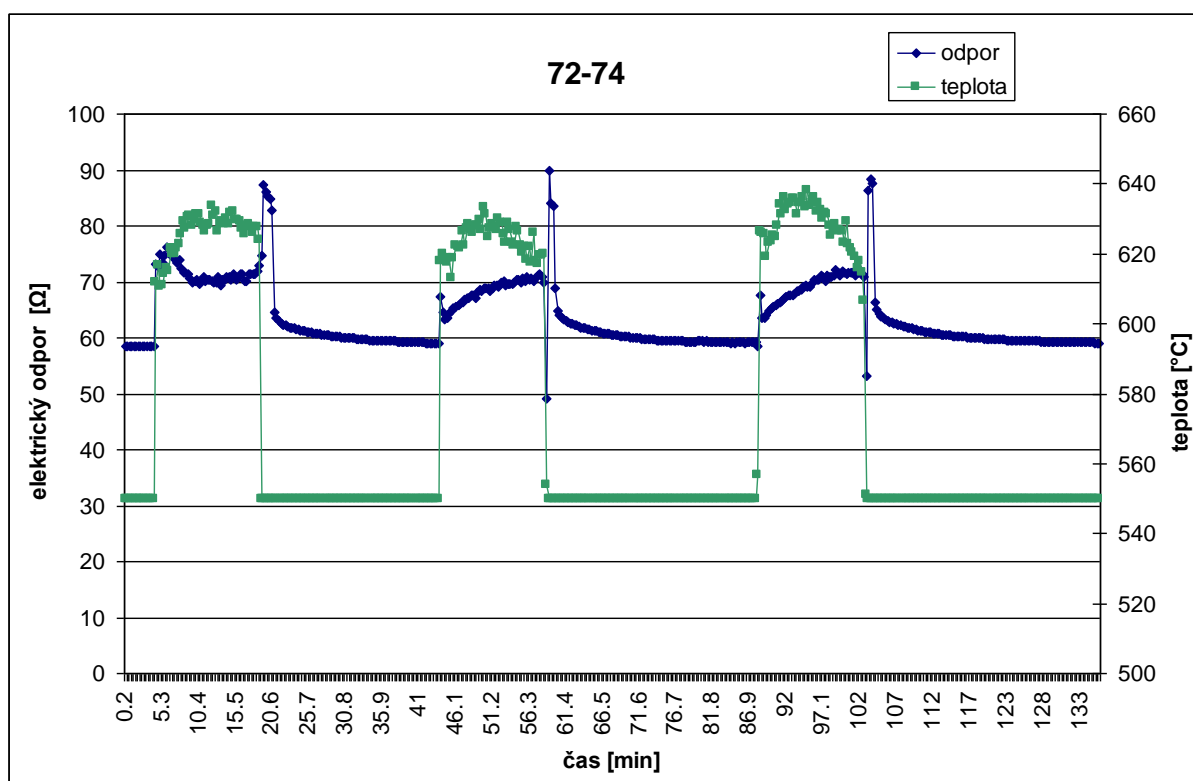
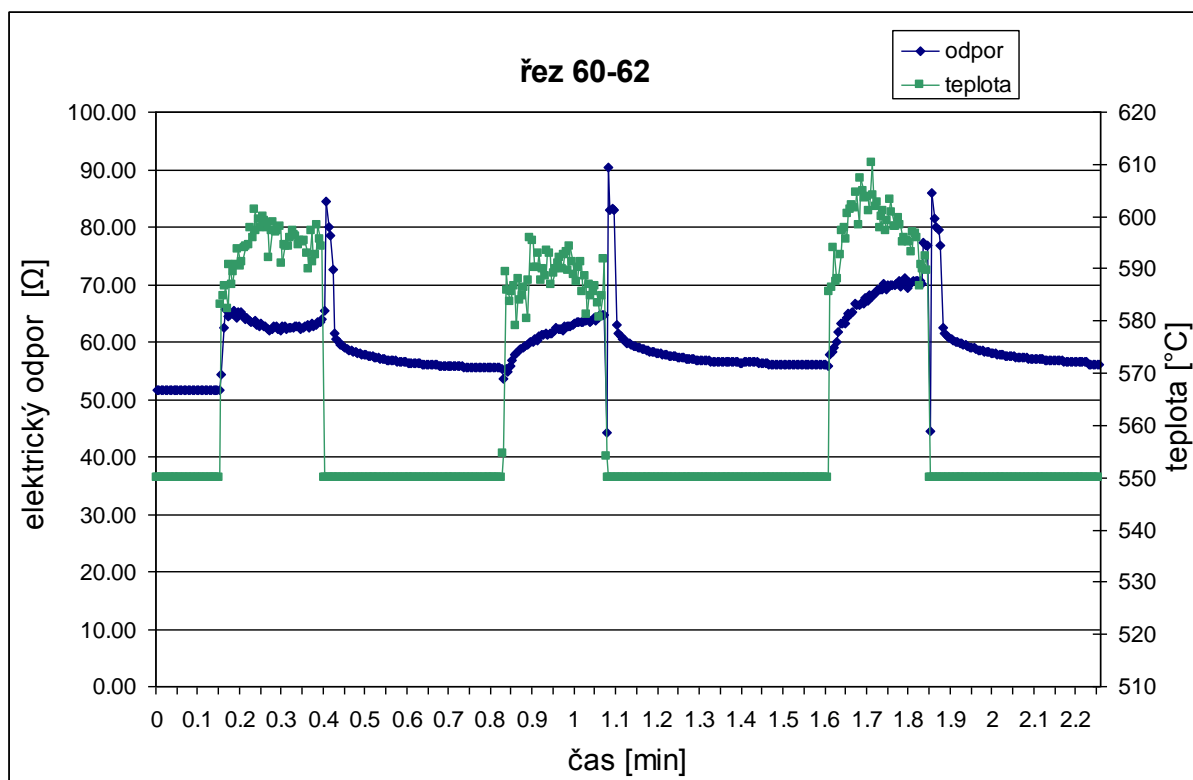
## Příloha č. 1 Vybranné grafy z měření na materiálu A



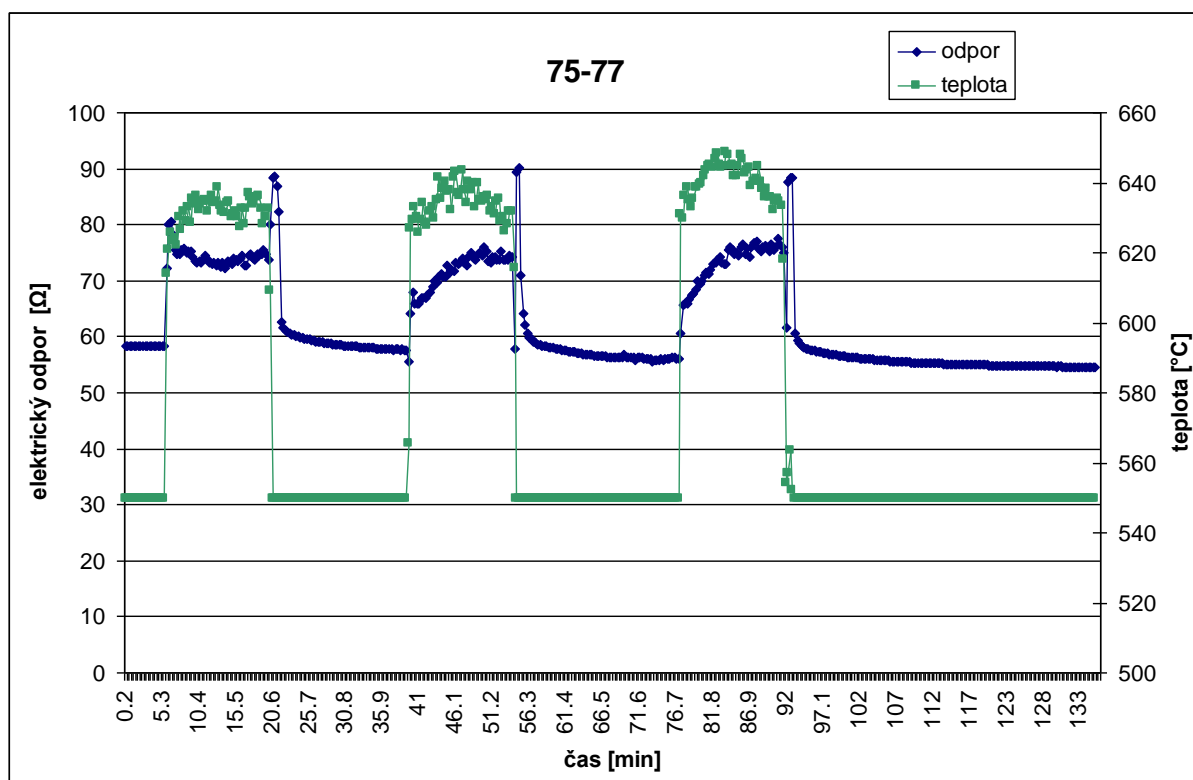












## Příloha č. 2 Tabulky emisivity. [36]

**Zkratky spektra :T:** celé spektrum; **SW:** 2–5  $\mu\text{m}$ ; **LW:** 8–14  $\mu\text{m}$ , **LLW:** 6,5–20  $\mu\text{m}$ 

materiál	specifikace	teplota v °C	spektrum	emisivita
bronz	fosforový bronz	70	LW	0,06
bronz	fosforový bronz	70	SW	0,08
bronz	leštěný	50	T	0,1
bronz	leštěný	200	T	0,03
bronz	leštěný do vysokého	100	T	0,03
bronz	matný	20-350	T	0,22
bronz	oxidovaný	70	SW	0,04-0,09
bronz	oxidovaný	70	LW	0,03-0,07
bronz	oxidovaný	100	T	0,61
bronz	oxidovaný při teplotě	200-600	T	0,59-0,61
bronz	plát, zdrsňený	20	T	0,2
bronz	porézni, zdrsňený	50-150	T	0,55
bronz	prášek		T	0,76-0,80
bronz	válcovaný plát	20	T	0,06
bronz	zdrsňený smirkovým	20	T	0,20
cínové železo	plát	24	T	0,064
červené olovo		100	T	0,93
červené olovo, prášek		100	T	0,93
galvanizované železo	leštěný plát	30	T	0,23
galvanizované železo	oxidovaný plát	20	T	0,28
galvanizované železo	plát	92	T	0,07
galvanizované železo	velmi oxidovaná	70	SW	0,64
galvanizované železo	velmi oxidované	70	LW	0,85
hliník	anodizovaný, černý,	70	LW	0,95
hliník	anodizovaný, černý,	70	SW	0,67
hliník	anodizovaný, světle	70	LW	0,97
hliník	anodizovaný, světle	70	SW	0,61
hliník	anodizovaný plát	100	T	0,55
hliník	fólie	27	3 $\mu\text{m}$	0,09
hliník	fólie	27	10 $\mu\text{m}$	0,04
hliník	leštěná deska	100	T	0,05
hliník	leštěný	50-100	T	0,04-0,06
hliník	leštěný plát	100	T	0,05
hliník	odlité, očištěné	70	LW	0,46
hliník	odlité, očištěné	70	SW	0,47
hliník	oxidované, silně	50-500	T	0,2-0,3
hliník	plát, 4 vzorky, různě	70	LW	0,03-0,06

materiál	specifikace	teplota v °C	spektrum	emisivita
hliník	ponořený v HNO <sub>3</sub>	100	T	0,05
hliník	vakuově nanesený	20	T	0,04
hliník	ve stavu přijetí, deska	100	T	0,09
hliník	ve stavu přijetí, plát	100	T	0,09
hliník	zdrsněný	27		0,28
hliník	zdrsněný	27	10μm	0,18
hliník	zdrsněný povrch	20-50	T	0,06-0,07
hliníkový bronz		20	T	0,60
hořčík		22	T	0,07
hořčík		260	T	0,13
hořčík		538	T	0,18
hořčík	leštěné	20	T	0,07
hořčíkový prášek			T	0,86
hydroxid hlinitý	prášek		T	0,28
Chrom	leštěný	50	T	0,10
Chrom	leštěný	500-1000	T	0,28-0,38
měď	čistý, pečlivě připravený	22	T	0,008
měď	elektrolytická, leštěná	-34	T	0,006
měď	elektrolytická, pečlivě	80	T	0,018
měď	leštěná	50-100	T	0,02
měď	leštěná	100	T	0,03
měď	leštěná, strojově	22	T	0,015
měď	natavená	1100-1300	T	0,13-0,15
měď	obchodní, leštěná	20	T	0,07
měď	obchodní, leštěná	27	T	0,03
měď	oxidovaná	50	T	0,6-0,7
měď	oxidovaná, černá	27	T	0,78
měď	oxidovaná do čer-na		T	0,88
měď	velmi oxidovaná	20	T	0,78
měď	zaškrábaná	27	T	0,07
molybden		600-1000	T	0,08-0,13
molybden		1500-2200	T	0,19-0,26
molybden	vlákno	700-2500	T	0,1-0,3
nerezová ocel	leštěný plát	70	LW	0,14
nerezová ocel	leštěný plát	70	SW	0,18
nerezová ocel	pískované	700	T	0,70
nerezová ocel	plát ,neopracovaný	70	LW	0,28
nerezová ocel	plát, neopracovaný,	70	SW	0,30
nerezová ocel	slitina, 8 % Ni, 18 %Cr	500	T	0,35
nerezová ocel	typ 18-8, leštěná kůží	20	T	0,16
nerezová ocel	typ 18-8, oxidovaná při	60	T	0,85

materiál	specifikace	teplota v °C	spektrum	emisivita
nerezová ocel	válcovaná	700	T	0,45
nichrom	drát, čistý	500-1000	T	0,71-0,79
nichrom	drát, oxidovaný	50-500	T	0,95-0,98
nichrom	pískované	700	T	0,70
nichrom	válcovaný	700	T	0,25
nikl	drát	200-1000	T	0,1-0,2
nikl	elektrolytický	22	T	0,04
nikl	elektrolytický	38	T	0,06
nikl	elektrolytický	260	T	0,07
nikl	elektrolytický	538	T	0,10
nikl	elektrolytickynane-sený,	20	T	0,05
nikl	elektrolytickynane-sený	22	T	0,045
nikl	elektrolytickynane-sený	20	T	0,11-0,40
nikl	elektrolytickynane-sený	22	T	0,11
nikl	lesklý, matný	122	T	0,041
nikl	leštěné	122	T	0,045
nikl	obchodní, čistý, leštěný	100	T	0,045
nikl	obchodní, čistý, leštěný	200-400	T	0,07-0,09
nikl	oxidované při teplotě	200-600	T	0,37-0,48
nikl	oxidovaný	200	T	0,37
nikl	oxidovaný	227	T	0,37
nikl	oxidovaný	1227	T	0,85
olovo	lesklé	250	T	0,08
olovo	neoxidované, leštěné	100	T	0,05
olovo	oxidované, šedivé	20	T	0,28
olovo	oxidované, šedivé	22	T	0,28
olovo	oxidované při teplotě	200	T	0,63
plast	skelný laminát (deska	70	LW	0,91
plast	skelný laminát (deska	70	SW	0,94
platina		17	T	0,016
platina		22	T	0,03
platina		100	T	0,05
platina		260	T	0,06
platina		538	T	0,10
platina		1000-1500	T	0,14-0,18
platina		1094	T	0,18
platina	čistý, leštěný	200-600	T	0,05-0,10
platina	drát	50-200	T	0,06-0,07
platina	drát	500-1000	T	0,10-0,16
platina	drát	1400	T	0,18
platina	pásek	900-1100	T	0,12-0,17

materiál	specifikace	teplota v °C	spektrum	emisivita
polystyren	izolační	37	SW	0,60
porcelán	glazura	20	T	0,92
pryž	měkká, šedá, hrubá	20	T	0,95
pryž	tvrdá	20	T	0,95
struska	kotelní	0-100	T	0,97-0,93
struska	kotelní	200-500	T	0,89-0,78
struska	kotelní	600-1200	T	0,76-0,70
struska	kotelní	1400-1800	T	0,69-0,67
stříbro	čistý, leštěný	200-600	T	0,02-0,03
stříbro	leštěné	100	T	0,03
štuk	drsny, vápenný	10-90	T	0,91
tapeta	jemný vzorek, červená	20	SW	0,90
tapeta	jemný vzorek, světle	20	SW	0,85
titan	leštěné	200	T	0,15
titan	leštěný	500	T	0,20
titan	leštěný	1000	T	0,36
titan	oxidovaný při teplotě	200	T	0,40
titan	oxidovaný při teplotě	500	T	0,50
titan	oxidovaný při teplotě	1000	T	0,60
uhlík	grafit, celistvý povrch	20	T	0,98
uhlík	grafitový prášek		T	0,97
uhlík	lampová čern	20-400	T	0,95-0,97
uhlík	prášek z dřevěného uhlí		T	0,96
uhlík	svíčkové saze	20	T	0,95
vápno			T	0,3-0,4
wolfram		200	T	0,05
wolfram		600-1000	T	0,1-0,16
wolfram		1500-2200	T	0,24-0,31
wolfram	vlákno	3300	T	0,39
zinek	leštěný	200-300	T	0,04-0,05
zinek	oxidované při teplotě	400	T	0,11
zinek	oxidovaný povrch	1000-1200	T	0,50-0,60
zinek	plát	50	T	0,20
zlato	leštěná	130	T	0,018
zlato	leštěné, pečlivě	200-600	T	0,02-0,03
zlato	leštěný do vysokého	100	T	0,02
železo, odlitek	ingoty	1000	T	0,95
železo, odlitek	leštěná	38	T	0,21
železo, odlitek	leštěné	40	T	0,21
železo, odlitek	leštěné	200	T	0,21
železo, odlitek	neopracované	900-1100	T	0,87-0,95

materiál	specifikace	teplota v °C	spektrum	emisivita
železo, odlitek	odlévané	50	T	0,81
železo, odlitek	oxidované	100	T	0,64
železo, odlitek	oxidované	260	T	0,66
železo, odlitek	oxidované	538	T	0,76
železo, odlitek	oxidované při teplotě	200-600	T	0,64-0,78
železo, odlitek	strojně opracované	800-1000	T	0,60-0,70
železo, odlitek	tekutina	1300	T	0,28
železo a ocel	broušený plát	950-1100	T	0,55-0,61
železo a ocel	čerstvě opracované	20	T	0,24
železo a ocel	čerstvě válcované	20	T	0,24
železo a ocel	červená rez	20	T	0,69
železo a ocel	elektrolytické	22	T	0,05
železo a ocel	elektrolytické	100	T	0,05
železo a ocel	elektrolytické	260	T	0,07
železo a ocel	elektrolytické, jemně	175-225	T	0,05-0,06
železo a ocel	lesklá oxidovaná vrstva,	20	T	0,82
železo a ocel	lesklé, leptané	150	T	0,16
železo a ocel	leštěné	100	T	0,07
železo a ocel	leštěné	400-1000	T	0,14-0,38
železo a ocel	leštěný plát	750-1050	T	0,52-0,56
železo a ocel	neopracované, rovný	50	T	0,95-0,98
železo a ocel	oxidované	100	T	0,74
železo a ocel	oxidované	100	T	0,74
železo a ocel	oxidované	125-525	T	0,78-0,82
železo a ocel	oxidované	200	T	0,79
železo a ocel	oxidované	200-600	T	0,80
železo a ocel	oxidované	1227	T	0,89
železo a ocel	plát s červenou rzí	22	T	0,69
železo a ocel	pokryté červenou rzí	20	T	0,61-0,85
železo a ocel	silně oxidované	50	T	0,88
železo a ocel	silně oxidované	500	T	0,98
železo a ocel	silně rezavý plát	20	T	0,69
železo a ocel	silně zrezivělý	17	SW	0,96
železo a ocel	tvářené, jemně leštěné	40-250	T	0,28
železo a ocel	válcované za studena	70	LW	0,09
železo a ocel	válcované za studena	70	SW	0,20
železo a ocel	válcované za tepla	20	T	0,77
železo a ocel	válcované za tepla	130	T	0,60
železo a ocel	válcovaný plát	50	T	0,56